

Zuwendungsempfänger: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik	Förderkennzeichen: 03x3029C
Vorhabensbezeichnung: NEWA – Neue werkstoffbasierte Aktoren zur adaptiven Formänderung	
Laufzeit: 01.01.2011 – 31.12.2013	

Schlussbericht

des DLR Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik im Projekt NEWA



Dipl.-Ing. Markus Kintscher, Dipl.-Ing. S. Geier, Dipl.-Ing. C. Heinze,
Dipl.-Ing. M. Pohl, Dipl.-Ing. B. v. d. Kamp



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	KURZDARSTELLUNG	3
1.1	MOTIVATION UND AUFGABENSTELLUNG	3
1.2	PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS.....	5
1.3	STAND DER TECHNIK.....	8
2	EINGEHENDE DARSTELLUNG	9
2.1	ERZIELTE ERGEBNISSE	9
2.1.1	<i>Konzeptstudien, Auslegung und Simulation</i>	<i>10</i>
2.1.2	<i>Materialversuche</i>	<i>20</i>
2.1.3	<i>Komponentenversuche.....</i>	<i>29</i>
2.1.4	<i>OCM-System.....</i>	<i>44</i>
2.2	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	64
2.3	VERWERTBARKEIT	65
3	LITERATURANGABEN	66

1 Kurzdarstellung

1.1 Motivation und Aufgabenstellung

Technologieschwerpunkt und Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung und Erprobung neuer Bauweisen und Fertigungskonzepte für hochbeanspruchte, formadaptive Strukturteile in Faserverbundbauweise unter Einsatz von werkstoffbasierten Aktoren für maritime Anwendungen. Im Vordergrund der Entwicklung steht die kombinierte "Vor-Anker"- und "In - Fahrt"- Stabilisierung, die bisher noch nicht befriedigend umgesetzt werden konnte.

Entwicklungsschwerpunkte sind:

- Konzepte zur aktiven Flossensteuerung durch robuste werkstoffbasierte Aktoren zur adaptiven Formanpassung hochbelasteter FKV-Strukturbauteile,
- Innovative Verbindungskonzepte für hybride FKV-Strukturen,
- Neuartige multifunktionale Überwachungssysteme (Online-Condition-Monitoring).

Während des Fahrbetriebes führen Schiffe unter dem Einfluss der Seewasserströmung und der Windverhältnisse mehr oder weniger ständig schwingende, zum Teil ganz unregelmäßige Bewegungen aus. Ursache hierfür ist die Lagerung des Schiffskörpers mit insgesamt sechs Freiheitsgraden in Kombination mit den einwirkenden chaotischen Wellenkräften unterschiedlicher Wirkungslinien. Eine stabile Schwimmlage ist jedoch von grundlegender Bedeutung für den reibungslosen Schiffsbetrieb und nicht zuletzt für einen gesundheitlich verträglichen Aufenthalt an Bord. Hierbei ist die Rollbewegung um die Schiffsängsachse als besonders kritisch zu bewerten. Zur Reduzierung dieser Bewegung werden Schiffe mit sogenannten Festflossen-Stabilisatoren ausgestattet. Ein derartiger Stabilisator besteht aus einem oder mehreren Flossenpaaren, die an den Außenwänden des Schiffes unterhalb der Wasserlinie angebracht sind. Beginnt ein Schiff zu rollen, erzeugen die Flossen gezielt ein aufrichtendes Kräftepaar, d.h., sie bewegen sich entgegen der Wellenbewegung (Abbildung 1.1).

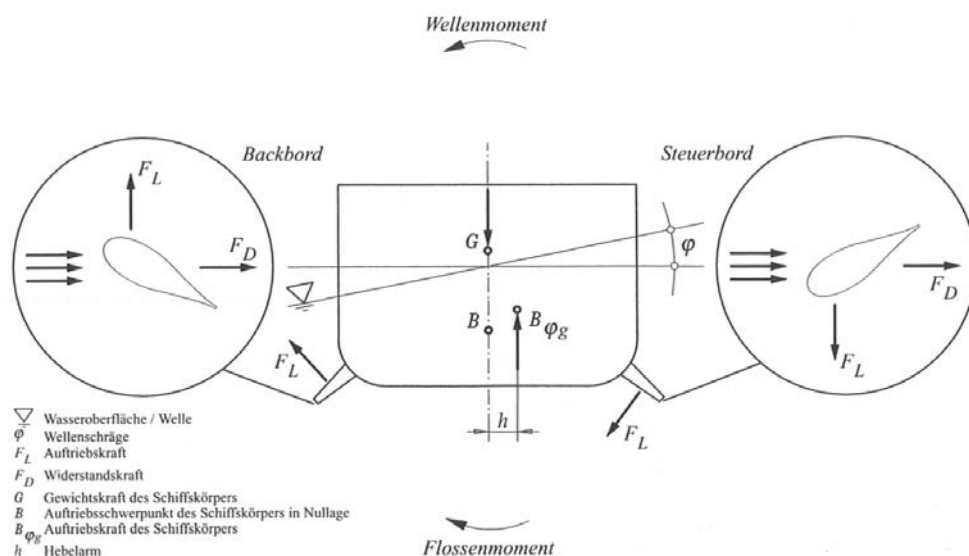


Abbildung 1.1: Wirkprinzip der Flossenstabilisierung.

Das resultierende Moment ergibt einen zusätzlichen Auftrieb und verringert die Rollbewegung im Seegang. Durch eine Änderung des Anstellwinkels kann die Auftriebswirkung der Flossen beeinflusst werden. Stabilisatoren dienen somit der aktiven Regelung des Rollwinkels, da sie einer Auslenkung entgegenwirken und das Schiff nach einer Auslenkung in die Ausgangslage zurückführen.

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anforderungsprofile für die "Vor-Anker"- und "In -Fahrt"- Stabilisierung, ergibt sich die Notwendigkeit zur Entwicklung eines adaptierbaren Flossenkörpers, der in einem weiten Geschwindigkeitsband effektiv und wirtschaftlich zur Rollstabilisierung des Schiffes eingesetzt werden kann.

Für jeden Geschwindigkeitsbereich des Schiffes soll die Flosse in einem optimalen Arbeitsbereich gefahren werden können. Dabei muss sichergestellt werden, dass für eine "Vor-Anker"-Stabilisierung eine stark unterbalancierte Flosse mit möglichst großer, optimal gestalteter Flossenfläche gegeben ist. Nur so können die hydrostatischen Kräfte erzeugt werden, um das aufrichtende Moment zu bewirken. Derartige Flossen erfordern jedoch bei Fahrt hohe Antriebsmomente. Daraus ergibt sich eine geringe Stabilisierleistung in Fahrt.

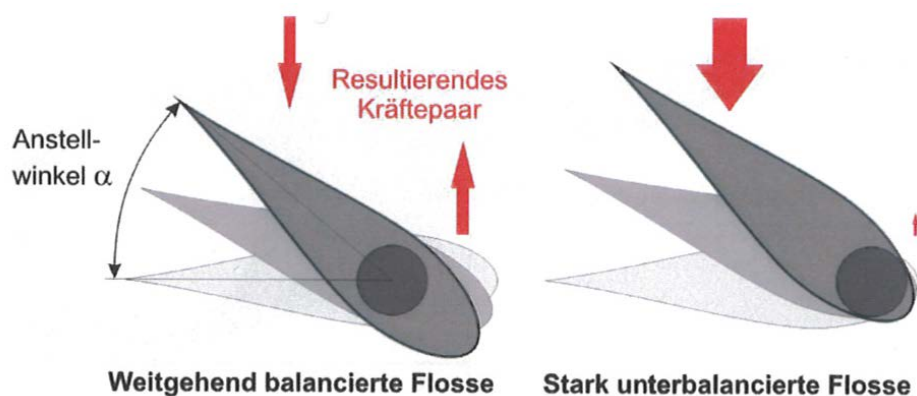


Abbildung 1.2: schematischer Vergleich der auftretenden Kräfte zwischen einer weitgehend balancierten und einer stark unterbalancierten Flosse.

Entwicklungsziel war somit eine adaptive Flossengeometrie, die eine aktive Anpassung der Balancierung erlaubte. Hierfür standen unterschiedliche Lösungsansätze zur Verfügung. Diese sind z. B. die aktive Beeinflussung der Flossenbalancierung mittels einer verstellbaren Krafteinleitung oder Veränderung der effektiven Flossenfläche (Abbildung 1.3).

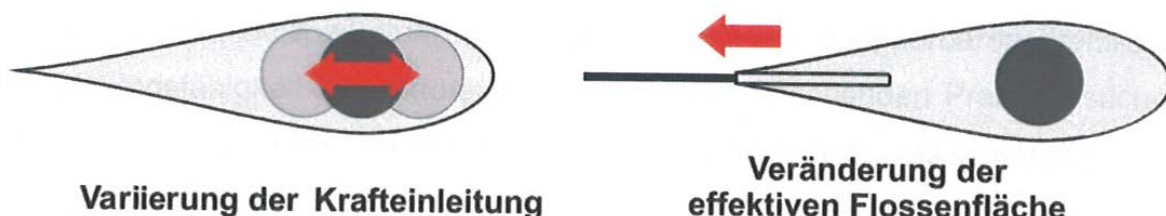


Abbildung 1.3: aktive Beeinflussung der Flossenbalancierung mittels Variation der Krafteinleitung oder Veränderung der effektiven Flossenfläche.

Beide Ansätze erforderten die Integration von geeigneten Mechanismen in den Flossenkörper. Dies stellte unter Berücksichtigung der besonderen Bedingungen der Wellenverhältnisse eine sehr hohe technische Herausforderung dar und erfordert entsprechende Entwicklungskompetenzen. Eine weitere Lösungsmöglichkeit stellte die Entwicklung einer variablen Abströmkante dar. Dieser Ansatz hatte ein Flossensystem zum Ziel, welches durch eine angepasste Auslegung der Steifigkeit der Flossenhinterkante oder durch aktive Ansteuerung in der Lage sein sollte, die Anforderungen zu erfüllen.

Die Flosse bleibt weiterhin stark unterbalanciert und erfüllte somit die Anforderung für den "Vor-Anker"-Betrieb. Für den "In-Fahrt"-Betrieb war die Abströmkante nachgiebig zu gestalten. Dies hatte zur Folge, dass sich die Druckverteilung an der Flosse veränderte und der Druckpunkt in Richtung Flossendrehachse verschoben wurde (Abbildung 1.4). Es wird dadurch eine Anpassung der Flossenbalancierung im Betrieb erreicht, mit dem Ergebnis, dass sich die Antriebsmomente bei gleichzeitiger Erhöhung der Stabilisierleistung in Fahrt verringern lassen.

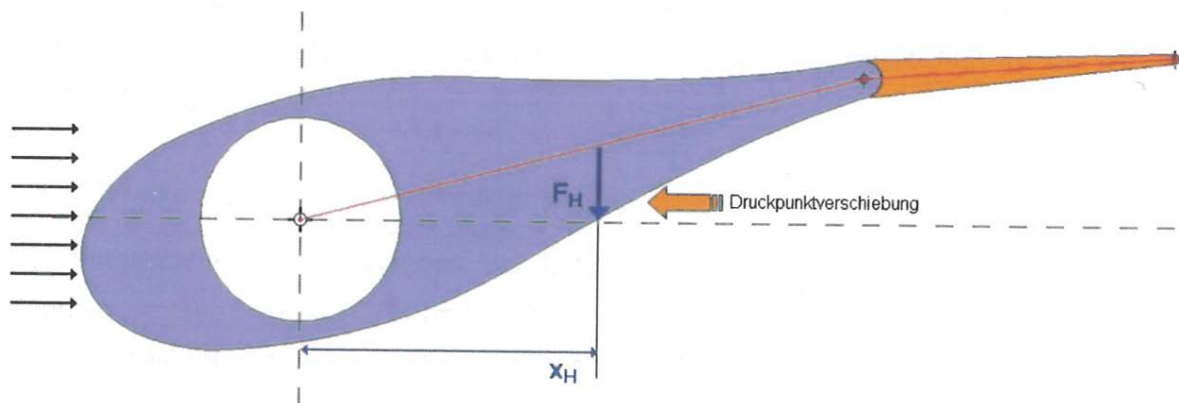


Abbildung 1.4: Prinzip der Beeinflussung der Flossenbalancierung durch eine nachgiebige Hinterkante.

Die Herausforderungen bestanden in

- einer festigkeitsgerechten Auslegung, die Verformungen der Hinterkante erlaubte groß genug sind, um die Flossenbalancierung positiv zu beeinflussen zu können und
- einer steifigkeitsgerechten Auslegung, die so auf die äußeren Lasten abgestimmt ist, dass exakt bei der gewünschten Last eine Verformung und somit Lastminderung einsetzt.

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablaufplan und die Arbeitsteilung zwischen den Projektpartnern wird in einer Übersicht in Abbildung 1.6 dargestellt.

In einer Konzeptphase erfolgte zu Beginn die Ausarbeitung eines Lasten- und Pflichtenhefts. Darauf aufbauend wurden Konzepte für die Umsetzung der einzelnen Aufgabenstellungen (Hauptflossenkörper/flexible Flossenhinterkante) erarbeitet. Was die Gestaltung der

Hauptflosse betrifft, wirkte das DLR bei der Konzepterstellung für eine geeignete Krafteinleitung mit. Des Weiteren erfolgte die Mitarbeit an dem Montage- und Demontagekonzept. In Bezug auf die Entwicklung geeigneter Fertigungsmethoden und dem eigentlichen Fertigungsprozess ergab sich eine enge Zusammenarbeit mit dem verantwortlichen Partner Baltico.

Arbeitsschwerpunkte des DLR waren die Entwicklung der Strukturkonzepte und der Materialsysteme für die Umsetzung der formadaptiven Flossenhinterkante. In verschiedenen Simulationsrechnungen wurden Konzepte auf ihre Realisierbarkeit hin überprüft. Es wurden Montagekonzepte für die Schnittstelle zur Hauptflosse erarbeitet. Gleichzeitig wurden Materialtests von potenziellen Materialsystemen geplant und durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Integration eines aktiven Systems an der Hinterkante der Flosse aufgrund der geforderten großen Verformungen und des begrenzten Bauraums schwierig umzusetzen war.

Die anspruchsvolle Aufgabenstellung bedingte eine Verlängerung der Konzeptphase. Verschiedene Konzepte waren durch Simulationsrechnungen zu überprüfen und auf ihre Eignung hin zu untersuchen. Ein Konzept, das sog. Querschlauchkonzept, erschien zunächst Erfolg versprechend. Dieses Konzept sah eine Verformung der Hinterkante durch einen hydraulisch veränderbaren Druck in Druckkissen vor. Nachteilig wirkte sich zu diesem Zeitpunkt das nicht überschaubare Entwicklungsrisiko in Bezug auf die Entwicklungsdauer und die verfügbaren Werkstoffe aus. Um das Entwicklungsrisiko in einem finanziell und zeitlich überschaubaren Rahmen zu halten, wurde parallel ein konventionelles Konzept zur Aktivierung der Hinterkante entwickelt. Ein wichtiger Faktor für die Beurteilung des Querschlauchkonzeptes war die Verträglichkeit der Schläuche mit dem von der Bundespolizei verwendeten Bio-Öl. Zur weiteren Untersuchung des Antriebskonzepts mittels Quer-Druckschläuchen wurde der erste Meilenstein um sechs Monate verschoben. Bei der Konzeptüberprüfung zum Zeitpunkt des Meilensteins musste festgestellt werden, dass die geforderte Ölverträglichkeit der Druckschlauchlösung nicht gegeben war. Damit kam das alternativ entwickelte passive Strukturkonzept zum Zuge. Ein weiteres sehr wichtiges Entscheidungskriterium war die Einhaltung des terminlich vorgegeben Dockungszeitpunktes, um die geplante Erprobung durch Fahrversuche im Projektzeitraum durchführen zu können.

Im Anschluss an die Konzeptphase konzentrierten sich die Arbeiten des DLR auf die Ausarbeitung der Bauunterlagen, Material- und Komponententests sowie der Entwicklung des OCM-Konzepts. Zur Beschleunigung der Entwicklung wurden extensive Materialuntersuchungen zu Hautmaterialien und elastischen Schaummaterialsystemen durchgeführt. Aufgrund des hoch-nichtlinearen Materialverhaltens, welches grundsätzlich in Simulationen nur unzureichend erfasst werden kann, wurde ein umfangreiches Testprogramm zur Erprobung des flexiblen Flossenteils mit Komponententest in Dauerlastversuchen geplant und durchgeführt.

Auf Basis der Materialuntersuchungen sowie der Komponententests konnte abschließend das endgültige Konzept im Dauerversuch für die Freigabe zur Fertigung bei der Firma Baltico qualifiziert werden.

BV FA BC BP

1 Konzeptphase												X	X	X	X		
1.1	Ausarbeitung von Lasten- und Pflichtenheft													●	○	○	○
1.2	Grundstruktur													●	○	○	
1.3	Krafteinleitung													○	○	●	○
1.4	Montage/Demontage													○			●
1.5	Aktive und/oder passive Strukturen														●	○	
1.6	Oberfläche															●	
1.7	Vorauswahl Fertigungsmethode bzw. Prozess													○	○	●	○
1.8	Hydraulikkonzept													●			○
1.9	Weiterentwicklung Antrieb													●			
2 Werkstoffmechanische Charakterisierung												X	X	X			
2.1	Materialauswahl													○	○	●	
2.2	Funktionsteilung													○	○	●	
2.3	Verbindung Metall/Faserverbundwerkstoff														○	●	
2.4	Validierung unter Umwelteinfluss															●	
3 Fertigungsmethoden														X	X		
3.1	Voruntersuchungen an Prüfkörpern															●	
3.2	Auswahl der Fertigungsmethoden														○	●	
3.3	Mathematische Darstellung der Wickelstruktur														○	●	
4 Aktive Strukturen												X	X	X			
4.1	Erstellung aktiver Strukturen														●	○	
4.2	Energie-/Datenübertragung													●		○	
4.3	Wirksamkeit, Stellweg, Verformungsverhalten													●	○	○	
4.4	Strömungsberechnungen													●	○	○	
4.5	Übertragung auf Großstruktur													○	○	○	
4.6	Online Condition Monitoring													○	●	○	

Abbildung 1.5: Ablauf und Arbeitsteilung mit dem Stand zum Projektende 31.12.2013, Teil 1.

BV FA BC BP

5 Entwurf, Berechnung und Auslegung													X	X	X	
5.1 Konstruktion eines Demonstr. (Gesamtsystem)													●		○	
5.2 Konstruktion eines Demonstr. (Flosse)														○	●	
5.3 Konstruktion eines Demonstr. (aktive Strukturen)														●	○	
5.4 Berechnung und Simulation der Struktur															●	
5.5 Berechnung und Simulation der Fertigung															●	
5.6 Strömungstechnische Untersuchungen													●		○	
5.7 Steuerung/Regelung													●			
6 Herstellung und experimentelle Untersuchungen													X	X	X	X
6.1 Bauteilerprobung (Tragstruktur, aktive Struktur...)													○	●	○	○
6.2 Dynamische Tests													○	●	○	
6.3 Herstellung des Demonstrators													○	○	●	
6.4 Montage Gesamtanlage													●	○	○	
6.5 Qualitätssicherung Bauteilfertigung (Flosse)													○	○	●	
7 Schiffszerprobung													X	X	X	X
7.1 Einbau in den Versuchsträger													●			○
7.2 Erprobung im Betrieb													○			●
7.3 Begleitete Messfahrten													○	○	○	●
8 Konstruktionsrichtlinie - Richtlinienkonformität													X	X	X	
8.1 Erstellung der Konstruktionsdokumentation													○	○	●	
9 Gesamtbewertung													X			
9.1 Auswertung der Erprobung													●			
9.2 Ermittlung Herstellkosten													●			
9.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung													●			

Abbildung 1.6: Ablauf und Arbeitsteilung mit dem Stand zum Projektende 31.12.2013, Teil 2.

Legende:

BV – Blohm und Voss

FA – DLR Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

BC – Firma Baltico

BP – Bundespolizei

○ = Mitarbeit, ● = verantwortlich

1.3 Stand der Technik

Bei der Durchführung des Vorhabens konnte auf die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Projekt FAFLO (FKZ: 03X3003) zurückgegriffen werden. Dort waren bereits die positiven Eigenschaften und geometrischen Gestaltungsmöglichkeiten von FKV beim Einsatz im maritimen Bereich prinzipiell nachgewiesen worden. Die Eignung für die Seewasserbeständigkeit konnte im Grundsatz belegt werden. Korrosionsprobleme konnten wegen der elektrochemischen Neutralität dieser Werkstoffgruppe nicht festgestellt werden.

Die Konzeptentwicklung der flexiblen Flossenhinterkante stützt sich auf bekannte Bauweisen und Patente, wie sie auch im Flugzeugbau untersucht werden. Eine zentrale Rolle spielen Vorarbeiten aus dem Leitprojekt „Adaptiver Flügel“ (FKZ: 03N8500/8) die von Daimler-Benz Aerospace Airbus und dem DLR durchgeführt wurden.

Insbesondere das dort entwickelte Konzept von mehreren elastischen Speichen bzw. Spanten in Spannweitenrichtung ([1]-[4]) wurde übernommen und weiterentwickelt. Weiterhin sind in die Entwicklung der flexiblen Flossenhinterkante Kenntnisse aus dem Forschungsgebiet des „Morphing Wing“ wie z.B. aus der Entwicklung der formvariablen Vorderkante ([5]-[10]) eingeflossen.

Die verwendete allgemeine und aber auch faserverbundspezifische Fachliteratur ist mit [11] - [16] in der Literaturangabe aufgeführt.

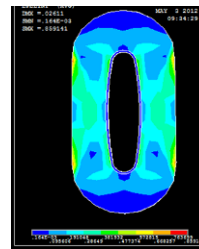
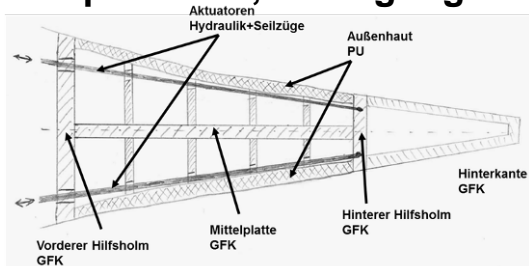
2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

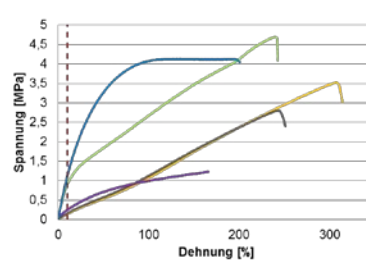
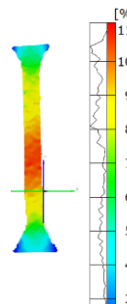
Wie schon in der Kurzdarstellung beschrieben, fanden die hauptsächlichen Entwicklungsarbeiten des DLR an der flexiblen Flossenhinterkante auf folgenden Gebieten statt:

1. Durchführung von numerischen Simulationen zur Auslegung und Überprüfung der Realisierbarkeit im Rahmen verschiedener Konzeptstudien sowie Ausarbeitung der Konzepte,
2. Durchführung von Materialversuchen zur Unterstützung der Simulationsrechnungen als Voraussetzung für die Entscheidung bezüglich der auszuwählenden Polyurethan-Haut und des einzusetzenden, konturgebenden Schaummaterials und Bestimmung der Materialkennwerte zur Durchführung der Simulationsrechnungen,
3. Durchführung von diversen Komponententests von den Segmenten der flexiblen Flossenhinterkante wobei der Einsatz von verschiedenen Materialien und Materialkombinationen unter Dauerbelastung auf ihre Eignung hin untersucht wurde.

Konzeptstudien, Auslegung und Simulation



Materialversuche



Komponententests

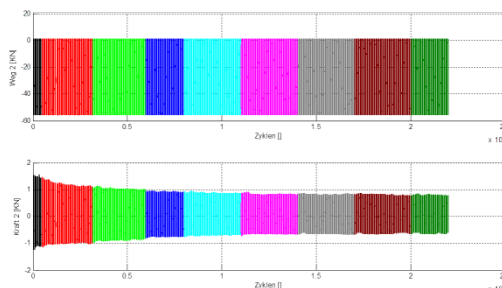


Abbildung 2.1: Gliederung der Entwicklungsarbeiten.

2.1.1 Konzeptstudien, Auslegung und Simulation

In den Konzeptstudien wurde eine Trennung zwischen Hauptflosse und flexibler Flossenhinterkante vorgenommen. Dies entsprach der vorgesehenen Arbeitsteilung mit der Firma Baltico. Es wurden sowohl passive bzw. semi-aktive Konzepte als auch aktive Konzepte in Betracht gezogen, die sich durch die folgenden Charakteristika auszeichneten:

Semiaktive Flossenhinterkante

- Einstellung der Flossenhinterkante über passive Druckkräfte
- Anpassung der Steifigkeit und Verstellgeschwindigkeit

Vollaktive Flossenhinterkante

- Aktive Verstellung, je nach Einsatzzweck über Aktuator,
- Blockierung der Flossenhinterkante beim Standbetrieb
- Auslenkung der Hinterkante im Fahrbetrieb
- Einsatz von ohnehin vorhandenen Hydrauliksystemen.

Da eine Auslenkung der Flossenhinterkante in beide Richtungen (oben/unten) erfolgen muss, wurde bereits innerhalb des ersten Halbjahres ein Strukturkonzept mit mehreren Speichen bzw. Holmen in Spannweitenrichtung ausgewählt und simuliert (Abbildung 2.2.)

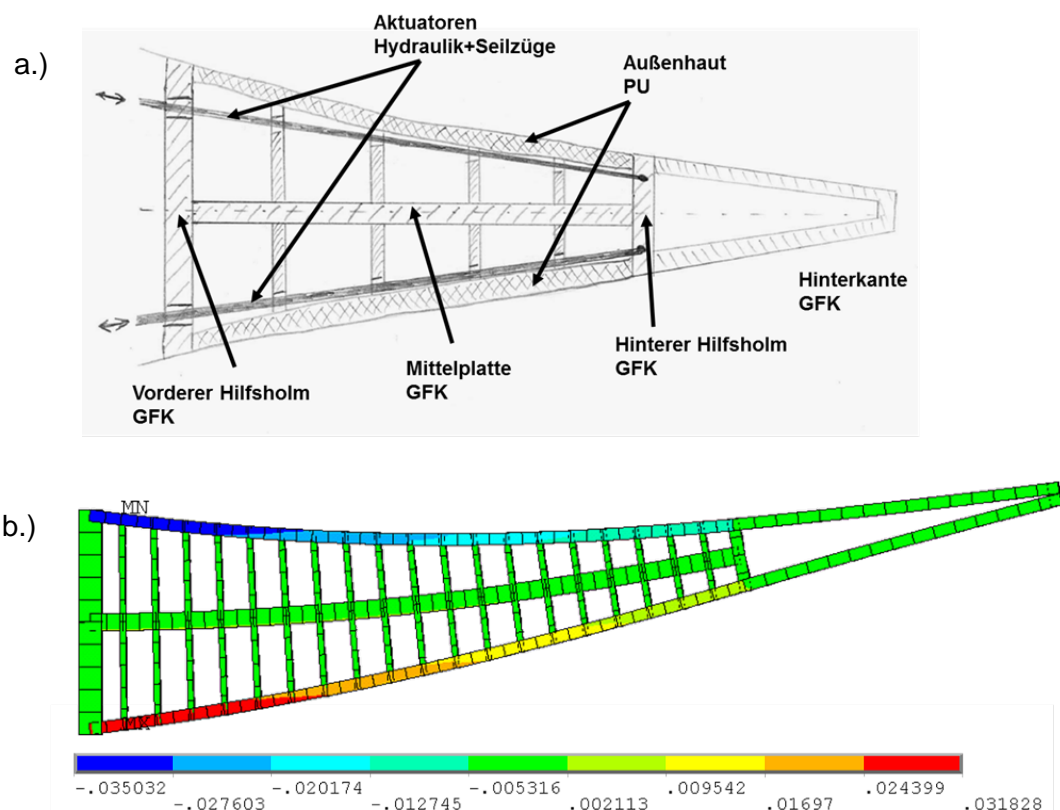


Abbildung 2.2: Strukturkonzept und Simulation des Dehnungszustandes zur Abschätzung der Realisierbarkeit.

Dabei wurde bereits frühzeitig deutlich, dass bei der erforderlichen Verformung von 10° - 12° an der Hinterkante, Dehnungen bis zu 3.5% in der Außenhaut entstehen (vgl. Abbildung 2.2b) würden. Die Verwendung von Polyurethan als Hautmaterial wurde daher eingehend diskutiert und in Materialversuchen näher untersucht. Für die flexible Flossenhinterkante wurden die Antriebskonzepte

- Hydraulikzylinder in flexiblem Bereich,
- „gekröpfte Stange“ und
- Querschlauch-/Druckschlauchantrieb

untersucht. Dabei wurden die Drucklasten für die Betriebszustände „Vor-Anker“ und „In-Fahrt“ geschätzt, da keine Druckverteilungen/-lasten von BVI zur Verfügung gestellt werden konnten. Die Realisierbarkeit aller drei Konzepte erschien zunächst möglich, konnte jedoch aufgrund der fehlenden Druck- bzw. Lastdaten nicht weiter beurteilt werden.

Aufgrund der Vorteile der Druckschlauchlösung wie z.B. flächige Krafteinleitung, geringes Gewicht, Hydraulikanlage bereits vorhanden, wurde zunächst dieser Lösungsansatz weiterverfolgt. Der erste Meilenstein wurde zur weiteren Untersuchung des Antriebskonzepts mittels Quer-Druckschläuchen um sechs Monate verschoben. Dieser Zeitraum konnte genutzt werden, um wichtige Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen der elastischen Antriebsstruktur der Druckschläuche und der Glasfaserstruktur zu untersuchen. Aufgrund der nicht-linearen Eigenschaften der Querdruckschläuche im Betrieb mussten die verwendeten FE-Modelle angepasst und erweitert werden. So waren beispielsweise für eine korrekte Simulation die Berücksichtigung der nicht-linearen Materialeigenschaften der Quer-Druckschläuche, des Hautmaterials sowie die Verwendung von Kontaktelementen notwendig.

Aufgrund der fehlenden Materialkennndaten wurden die Einflüsse der gewählten Bauweise auf das Verformungsverhalten in speziellen Simulationen (nicht-linear/kontakt) getrennt untersucht (vgl. Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4).

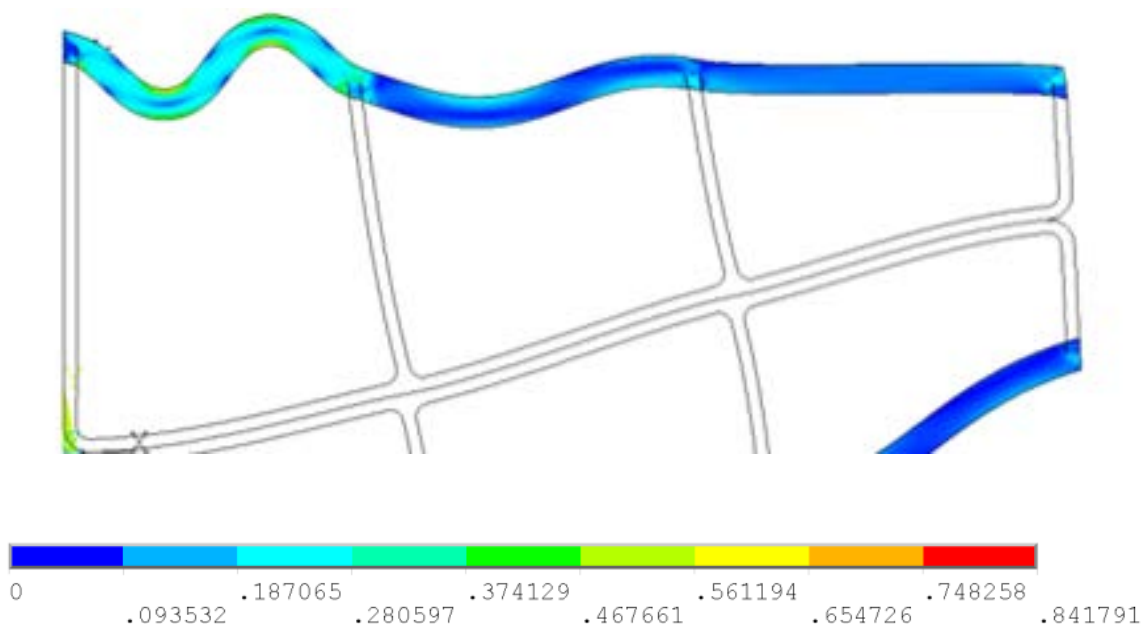


Abbildung 2.3: Simulation des Verhaltens einer Polyurethan-Haut unter Berücksichtigung des hyperelastischen Materialverhaltens sowie geometrisch nicht-linearem Verhalten. Farbverlauf des Dehnungszustandes mit maximaler Dehnung bis zu 84%.

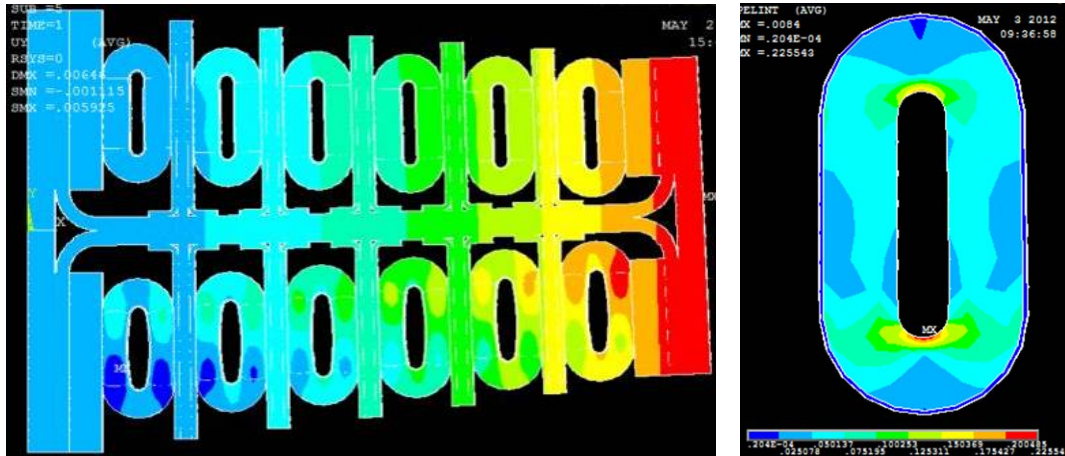


Abbildung 2.4: Simulation des Druckschlauchprinzips mit detaillierter Simulation des Dehnungszustandes im einzelnen Druckschlauch.

Da der detaillierte Aufbau der Druckschläuche vom Hersteller (Fa. Guédon) nicht bekannt gegeben bzw. zur Verfügung gestellt wurde, mussten bestimmte Annahmen über den Aufbau und das Material bzw. die Materialkennwerte der Druckschläuche für die Simulationen getroffen werden.

Aufgrund der Ölunverträglichkeit der Druckkissen wurden passive Konzepte, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, diskutiert. Die Simulationsmodelle wurden entsprechend verändert, um das Verformungsverhalten und die Dehnungen in passiven Konzepten simulieren zu können.

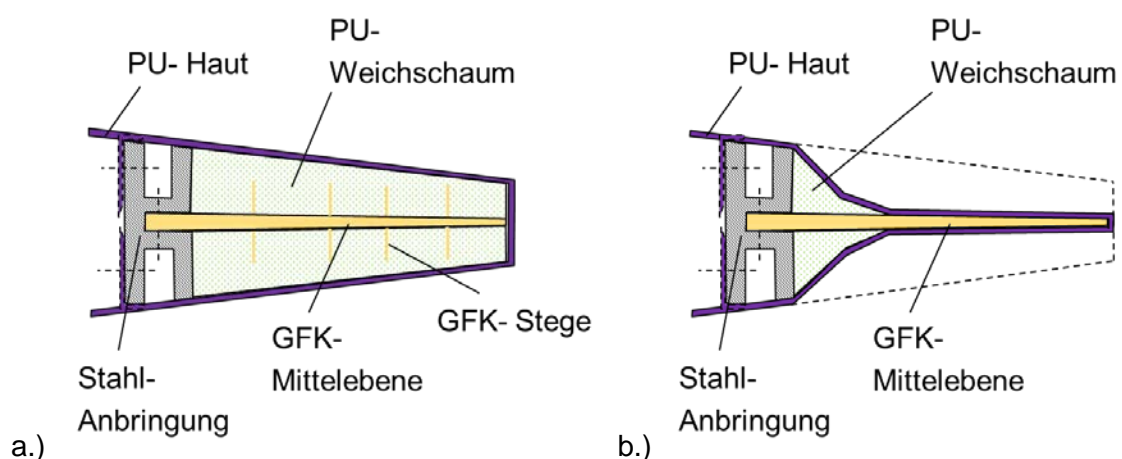


Abbildung 2.5: passive Konzepte zur flexiblen Flossenhinterkante.

Als Ergebnis wurde festgestellt, dass aufgrund der geringen Steifigkeit der PU-Haut zusätzlich ein Kern bzw. ein formgebendes Material unter der Haut erforderlich ist. Aufgrund einer durchgeführten Recherche zu elastischen Schaummaterialien wurde aufgrund der guten Anbindung von PU-Haut zu PU-Schaum auch ein PU-Schaum gewählt. Es wurden daher Simulationen zum Verformungsverhalten eines PU-Schaums durchgeführt (vgl. Abbildung 2.6).

Da keine spezifischen Materialdaten für die Simulation des Materialverhaltens vorlagen und die Simulationen des Verformungsverhaltens der Materialkombination aus PU-Haut, PU-Schaum und GFK-Mittelebene mit hoch nicht-linearem Materialverhalten grundsätzlich mit großen Unsicherheiten behaftet sind, erfolgte eine Abschätzung des Einflusses der PU-Haut sowie des PU-Schaums auf das Strukturverhalten.

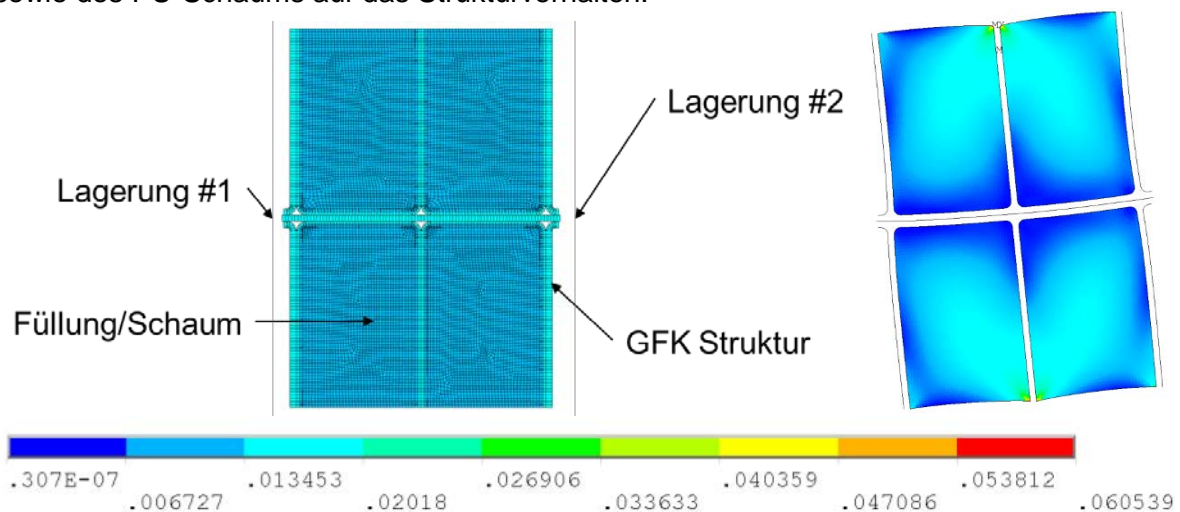


Abbildung 2.6: Simulation des Verhaltens eines PU-Schaumkerns mit dünner GFK-Mittelebene zur Ermittlung der Dehnungsverteilung unter Drucklast.

Im Rahmen einer analytischen Berechnung der Struktursteifigkeit wurde anhand eines Ersatzmodells der Einfluss der Steifigkeit der Einzelkomponente (PU-Haut, PU-Schaum und GFK-Mittelebene) auf das Strukturverhalten der Gesamtstruktur abgeschätzt. Die analytische Abschätzung des Einflusses des steiferen PU-Hautmaterials (WeiCon 60) ergab aufgrund der hohen Steifigkeit des GFKs keinen relevanten Einfluss auf das Strukturverhalten.

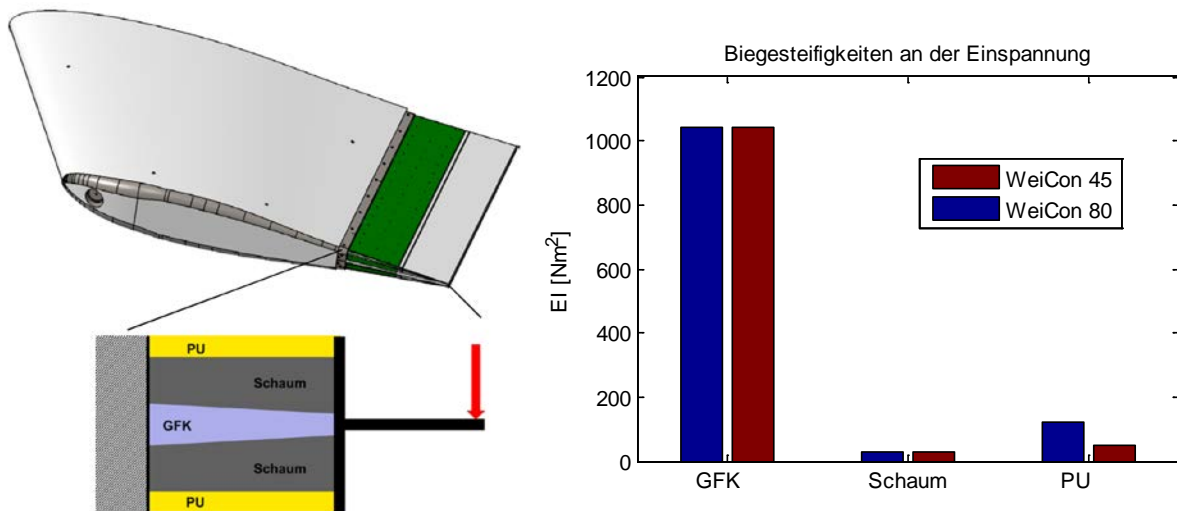


Abbildung 2.7: Ersatzmodell und Abschätzung des Einflusses der Einzelkomponenten (PU-Haut, PU-Schaum und GFK-Mittelebene).

Als Beispielkonfiguration wurde dabei folgende Konfiguration angenommen:

- Dicke GFK = 10mm
- Dicke GFK mit Schaum = 15cm
- Dicke PU = 5mm
- Breite = 0.5m

Die weiteren Simulationen konzentrierten sich daher auf die Auslegung und Ermittlung der Festigkeit der GFK-Mittelebene. Das Verhalten und die Eigenschaften der PU-Materialien wurden experimentell in diversen Versuchen bestimmt.

In Abstimmung mit der Fa. BaltiCo wurde schließlich der in Abbildung 2.8 dargestellte Aufbau und das zugehörige Fertigungskonzept für die finale Flosse erstellt. Entsprechend der Geometrie wurden FE-Simulationen durchgeführt, um den Einfluss der Bohrungen und das globale Dehnungs- bzw. Spannungsbild unter den bekannten Belastungszuständen zu ermitteln.

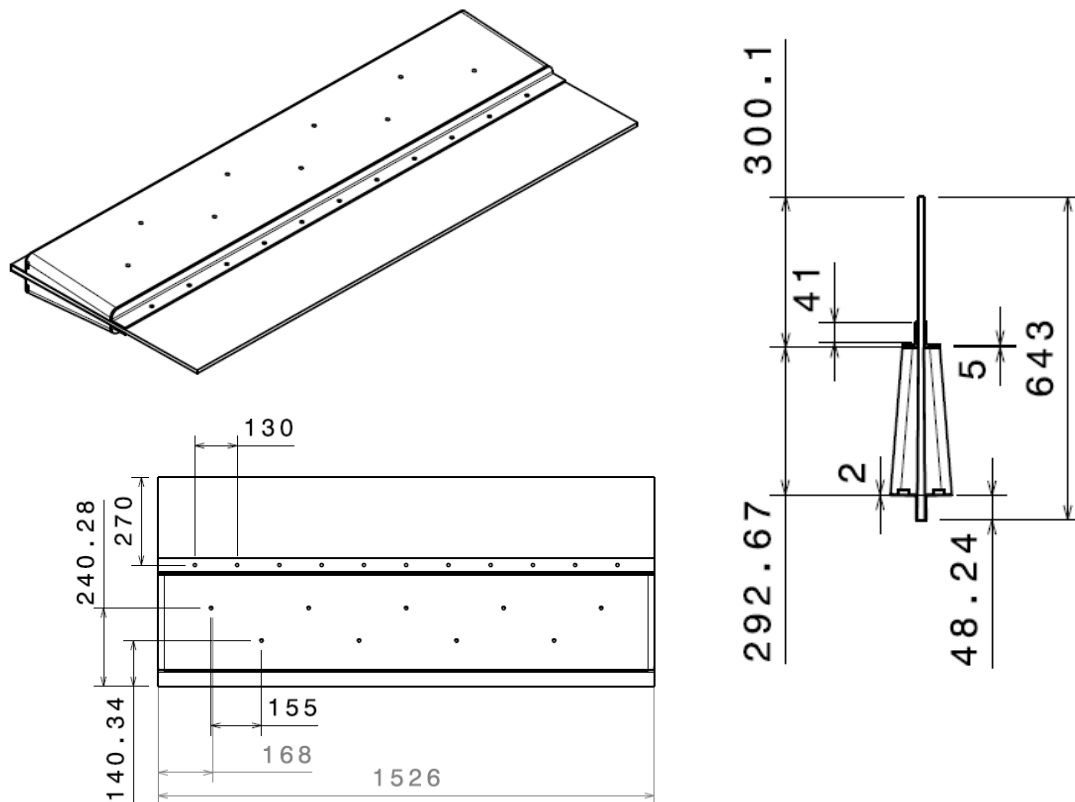


Abbildung 2.8: Aufbau und Geometrie des flexiblen Flossenelements.

Der Aufbau des Elements ist mit zugehörigem Lagenaufbau in Abbildung 2.9 dargestellt. Es werden folgende Geometrien und Materialien verwendet:

- Mittelebene: 15.6mm – 13.3mm
- L-Winkel: 2.0mm
- GFK-Material: 0°/90°-Interglass 92115/ 0°/45°/90°/-45°-Quadrax S32EQ260
- Harz: 1710i

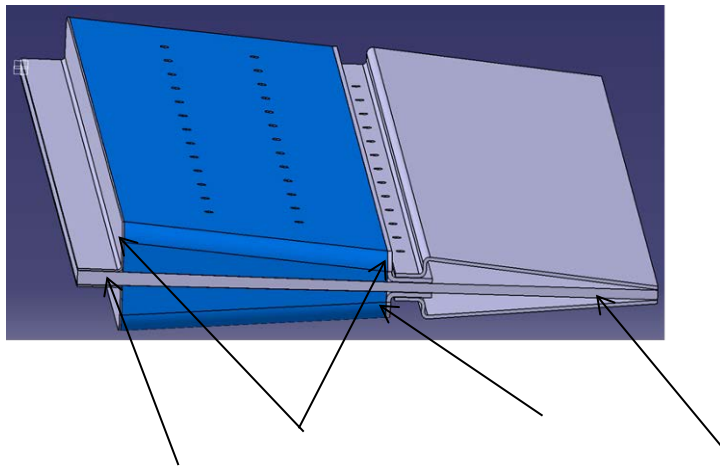


Abbildung 2.9: Aufbau des flexiblen Elements und der starren Hinterkante (Vorschlag DLR).

Bereich I			Bereich II von 53mm bis 111mm			Bereich III von 111mm bis 169mm			Bereich IV von 169mm bis 227mm			Bereich V von 227mm bis 285mm			Bereich VI von 285mm bis 343mm		
Lage	Dicke	Material	Lage	Dicke	Material	Lage	Dicke	Material	Lage	Dicke	Material	Lage	Dicke	Material	Lage	Dicke	Material
1	0,8	Quadrax	1	0,8	Quadrax	1	0,8	Quadrax	1	0,8	Quadrax	1	0,8	Quadrax	1	0,8	Quadrax
2	0,125	Interglass															
3	0,125	Interglass															
4	0,125	Interglass	2	0,125	Interglass												
5	0,125	Interglass	3	0,125	Interglass	2	0,125	Interglass									
6	0,125	Interglass	4	0,125	Interglass	3	0,125	Interglass									
7	0,125	Interglass	5	0,125	Interglass	4	0,125	Interglass	2	0,125	Interglass						
8	0,125	Interglass	6	0,125	Interglass	5	0,125	Interglass	3	0,125	Interglass						
9	0,125	Interglass	7	0,125	Interglass	6	0,125	Interglass	4	0,125	Interglass	2	0,125	Interglass			
10	0,125	Interglass	8	0,125	Interglass	7	0,125	Interglass	5	0,125	Interglass	3	0,125	Interglass			
11	0,125	Interglass	9	0,125	Interglass	8	0,125	Interglass	6	0,125	Interglass	4	0,125	Interglass	2	0,125	Interglass
12	0,125	Interglass	10	0,125	Interglass	9	0,125	Interglass	7	0,125	Interglass	5	0,125	Interglass	3	0,125	Interglass
13	0,125	Interglass	11	0,125	Interglass	10	0,8	Quadrax	8	0,8	Quadrax	6	0,8	Quadrax	4	0,8	Quadrax
14	0,8	Quadrax	12	0,8	Quadrax	11	0,8	Quadrax	9	0,8	Quadrax	7	0,8	Quadrax	5	0,8	Quadrax
15	0,8	Quadrax	13	0,8	Quadrax	12	0,8	Quadrax	10	0,8	Quadrax	8	0,8	Quadrax	6	0,8	Quadrax
16	0,8	Quadrax	14	0,8	Quadrax	13	0,8	Quadrax	11	0,8	Quadrax	9	0,8	Quadrax	7	0,8	Quadrax
17	0,8	Quadrax	15	0,8	Quadrax	14	0,8	Quadrax	12	0,8	Quadrax	10	0,8	Quadrax	8	0,8	Quadrax
18	0,8	Quadrax	16	0,8	Quadrax	15	0,8	Quadrax	13	0,8	Quadrax	11	0,8	Quadrax	9	0,8	Quadrax
19	0,8	Quadrax	17	0,8	Quadrax	16	0,8	Quadrax	14	0,8	Quadrax	12	0,8	Quadrax	10	0,8	Quadrax
20	0,8	Quadrax	18	0,8	Quadrax	17	0,8	Quadrax	15	0,8	Quadrax	13	0,8	Quadrax	11	0,8	Quadrax
21	0,8	Quadrax	19	0,8	Quadrax	18	0,8	Quadrax	16	0,8	Quadrax	14	0,8	Quadrax	12	0,8	Quadrax
22	0,8	Quadrax	20	0,8	Quadrax	19	0,8	Quadrax	17	0,8	Quadrax	15	0,8	Quadrax	13	0,8	Quadrax
23	0,8	Quadrax	21	0,8	Quadrax	20	0,8	Quadrax	18	0,8	Quadrax	16	0,8	Quadrax	14	0,8	Quadrax
24	0,8	Quadrax	22	0,8	Quadrax	21	0,8	Quadrax	19	0,8	Quadrax	17	0,8	Quadrax	15	0,8	Quadrax
25	0,8	Quadrax	23	0,8	Quadrax	22	0,8	Quadrax	20	0,8	Quadrax	18	0,8	Quadrax	16	0,8	Quadrax
26	0,8	Quadrax	24	0,8	Quadrax	23	0,8	Quadrax	21	0,8	Quadrax	19	0,8	Quadrax	17	0,8	Quadrax
27	0,8	Quadrax	25	0,8	Quadrax	24	0,125	1	22	0,125	1	20	0,125	1	18	0,125	1
28	0,125	Interglass	26	0,125	Interglass	25	0,125	1	23	0,125	1	21	0,125	1	19	0,125	1
29	0,125	Interglass	27	0,125	Interglass	26	0,125	1	24	0,125	1	22	0,125	1			
30	0,125	Interglass	28	0,125	Interglass	27	0,125	1	25	0,125	1	23	0,125	1			
31	0,125	Interglass	29	0,125	Interglass	28	0,125	1	26	0,125	1						
32	0,125	Interglass	30	0,125	Interglass	29	0,125	1	27	0,125	1						
33	0,125	Interglass	31	0,125	Interglass	30	0,125	1									
34	0,125	Interglass	32	0,125	Interglass	31	0,125	1									
35	0,125	Interglass	33	0,125	Interglass												
36	0,125	Interglass	34	0,125	Interglass												
37	0,125	Interglass	35	0,125	Interglass												
38	0,125	Interglass															
39	0,125	Interglass															
40	0,8	Quadrax	36	0,8	2	32	0,8	2	28	0,8	2	24	0,8	2	20	0,8	2
Dicke:	15,8		15,3			14,8			14,3			13,8			13,3		

Abbildung 2.10: Lagenaufbau für den flexiblen Abschnitt.

Die Auslegung der Flosse wurde anhand der vorhandenen Druckdaten mittels FE-Simulationen der GFK-Mittelebene überprüft. Dabei standen nur für die Lastfälle

- Fahrtbetrieb, stationär, 18 Knoten und
- Z-Betrieb (Paddelbetrieb)

entsprechende Druckdaten zur Verfügung.

In Abbildung 2.11 ist die Geometrie des verwendeten FE-Modells dargestellt. Zu erkennen ist der flexible Teil (lila) und der starren Hinterkante (Türkis).

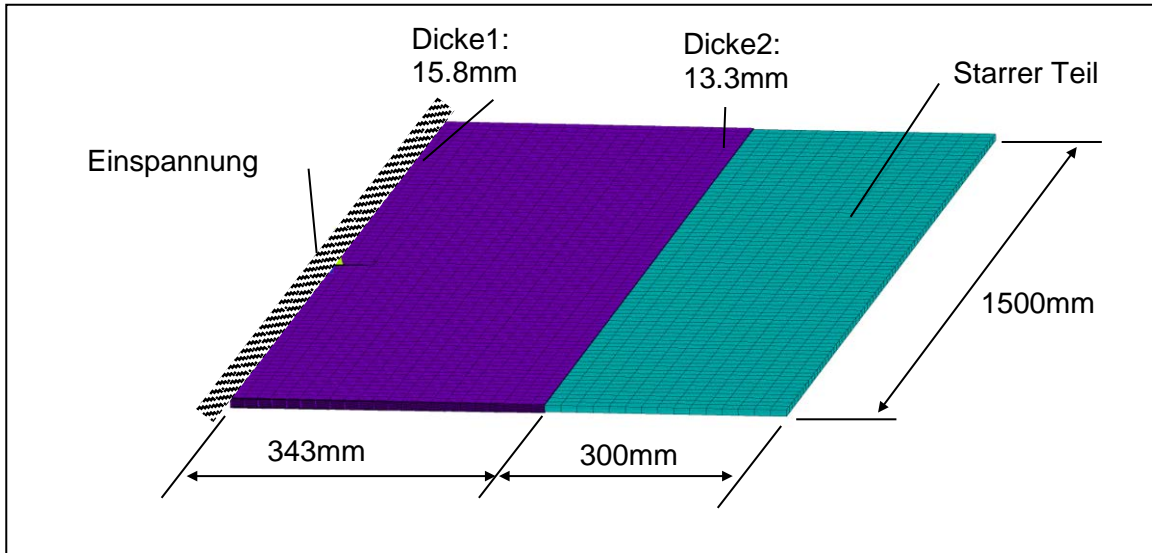


Abbildung 2.11: Geometrie und FE Modell der Mittelebene.

Ziel der Auslegung war die Begrenzung des Ausschlagwinkels der Flosse im Z-Betrieb auf unter 8° , um eine negative Auswirkung auf die Effektivität des Paddelbetriebs zu vermeiden. Für die festigkeitsgerechte Auslegung fehlten Druckdaten aus instationären CFD-Analysen, die das Strömungsbild beim Durchstellen der Flosse bei 18 kt maximal Fahrt im S-Betrieb abbilden. Da die festigkeitsgerechte Auslegung oberste Priorität hat, wurde eine maximal zulässige Dehnung von 0.4% Dehnung angenommen. Bei üblichen maximal möglichen Dehnungen von etwa 1% entspricht dies in etwa einem Sicherheitsfaktor von 2 in der Auslegung.

S-Betrieb:

Die Ergebnisse der Simulationen für Verformung und Dehnung sind in Abbildung 2.13 bis Abbildung 2.14 dargestellt. Die Druckdaten wurden für diese Simulation aus den Ergebnissen der CFD-Simulationen des DLR- Göttingen gemittelt. Wie in Abbildung 2.12 zu erkennen treten im S-Betrieb bei einer 500-mm-Schwanzflosse bei 35° Anstellwinkel der Flosse bei 0° Ausschlagwinkel der Hinterkante durchschnittliche Drücke von etwa -20000 N/m^2 auf der Saugseite und 7500 N/m^2 auf der Druckseite auf.

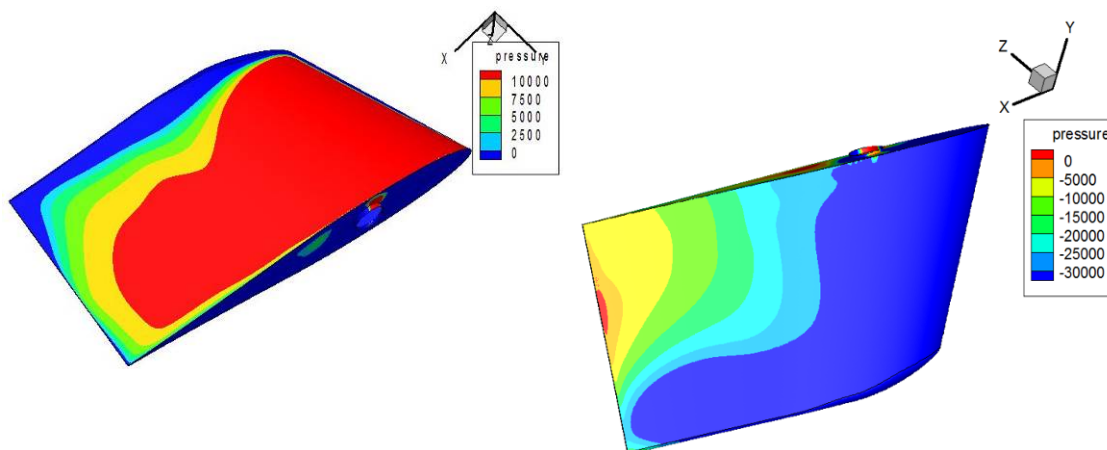


Abbildung 2.12: Druckverteilung für 500mm Schwanzflosse bei 35° Anstellwinkel der Flosse und 0° Ausschlagwinkel der Hinterkante.

Die Ergebnisse zu den entstehenden Dehnungen und Ausschlagwinkeln entsprechend der aufgetragenen Drucklasten sind in Abbildung 2.13 und Abbildung 2.14 dargestellt.

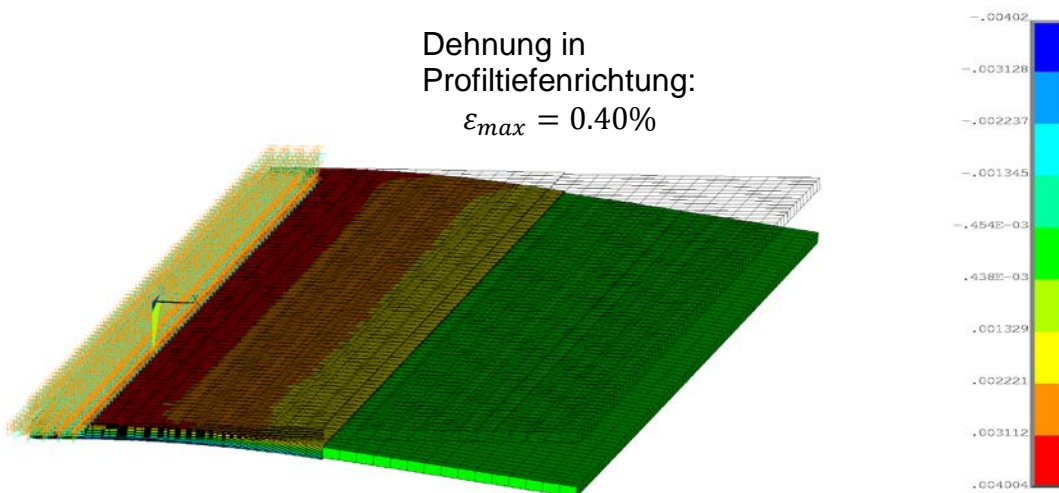


Abbildung 2.13: Dehnungsverteilung im S-Betrieb der Dehnung in Profiltiefenrichtung mit Maximalwerten bei etwa 0.4% Dehnung.

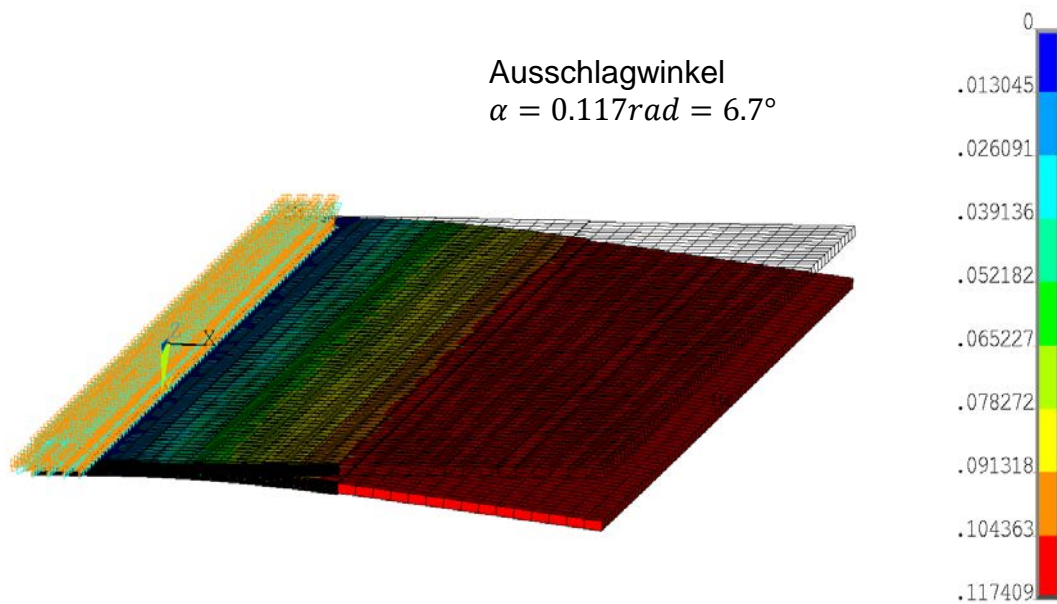


Abbildung 2.14: Rotation bzw. Ausschlagwinkel im S-Betrieb unter stationärer Anströmung, 0.117rad , 6.7° .

Die maximale Dehnung tritt an der Einspannstelle auf. Diese begrenzt letztendlich den zur Verfügung stehenden Ausschlagwinkel bei stationärer Anströmung im Betrieb auf 6.7° .

Z-Betrieb:

Für den Z-Betrieb wurden die aus instationären Rechnungen bei BVI durchgeführten CFD Rechnungen herangezogen. Für den Fall der Durchstellung von 60° in 3 Sekunden wurden die Drücke auf dem relevanten Teil der Flosse ermittelt (Abbildung 2.15). Für die Auslegung wurde entsprechend auf der Druckseite ein Druck von 10169N/m^2 und auf der Saugseite von -14687N/m^2 angenommen.

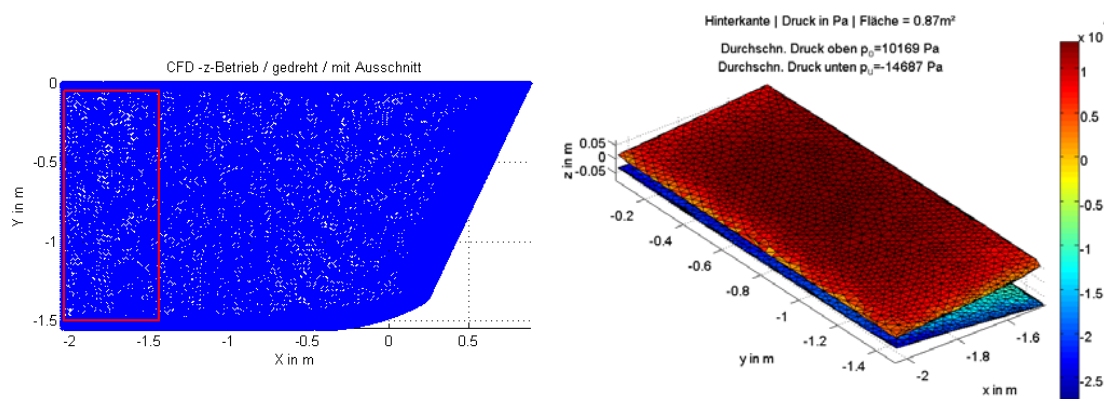
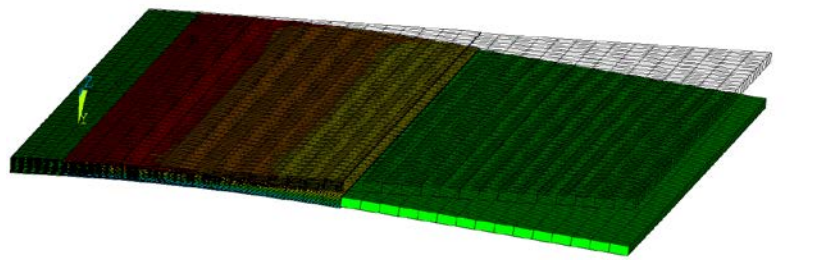


Abbildung 2.15: Druckdaten aus instationären CFD-Rechnungen von BVI für den Durchstellvorgang bei Paddelbetrieb (Z-Betrieb).

Für den Z-Betrieb resultieren aus den Berechnungen die in Abbildung 2.16 dargestellten Dehnungen und Verformungen.

Dehnung in
Profiltiefenrichtung:
 $\varepsilon_{max} = 0.36\%$



Ausschlagwinkel
 $\alpha = 0.106\text{rad} = 6.0^\circ$

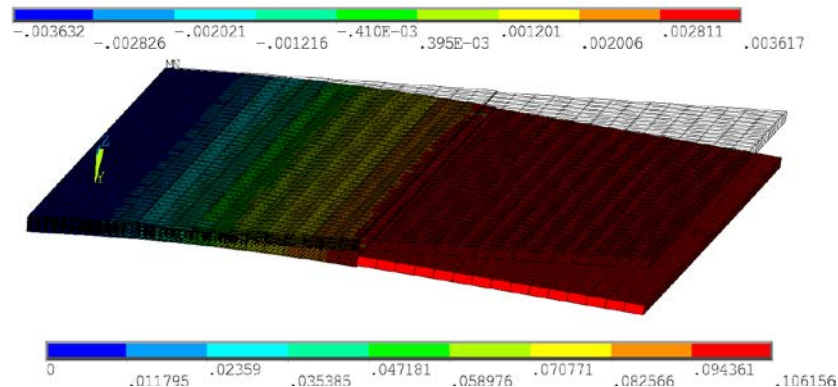


Abbildung 2.16: Dehnungsverteilung und Verteilung des Ausschlagwinkels der Schwanzflosse für die Drucklasten im Z-Betrieb.

Es zeigt sich, dass mit dem gewählten Aufbau in Abbildung 2.10 die Vorgabe des maximalen Ausschlagwinkels von 8° eingehalten wird. Limitierend für den Entwurf sind die Dehnungen im S-Betrieb, vor allem vor dem Hintergrund der unbekannten Belastung im tatsächlichen Betrieb, sodass ein hoher Sicherheitsfaktor gewählt werden musste.

2.1.2 Materialversuche

Für die Verwendung in FE-Simulationen und zur Auswahl geeigneter Materialien für den formgebenden Schaum sowie für das elastische Hautmaterial wurden diverse Versuche durchgeführt. Unter anderem wurden verschiedene Hautmaterialien auf die Änderung ihrer mechanischen Eigenschaften unter relevanten Umwelteinflüssen untersucht (Temperatur, Salzgehalt im Wasser).

Dazu wurden Zugprüfungen nach DIN ISO 37 durchgeführt. Wichtige Materialparameter für die Untersuchung sind:

- E-Modul,
- Festigkeit,
- Maximale Dehnbarkeit.

Es wurde dafür der Prüfkörpertyp 2 entsprechend der Norm verwendet:

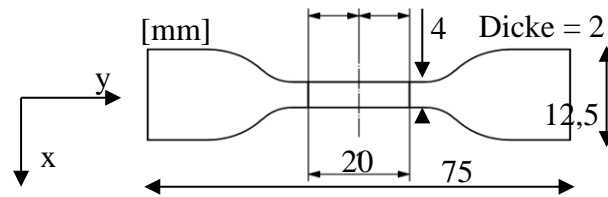


Abbildung 2.17: Prüfkörpergeometrie, Typ 2.

Optische Messungen wurden mittels des ARAMIS-Systems durchgeführt, d.h. Stereoaufnahmen eines optischen Musters auf einer belasteten Oberfläche. Dadurch konnten folgende Parameter ermittelt werden:

- Materialkontraktion in x-Richtung,
- Materialdehnung in y-Richtung,
- Querkontraktionszahl μ .



Abbildung 2.18: Versuchs- bzw. Messaufbau

Es wurden die vorzugsweise in Betracht kommenden PU-Hautmaterialien Weicon Urethan 45 und Weicon Urethan 80 untersucht:

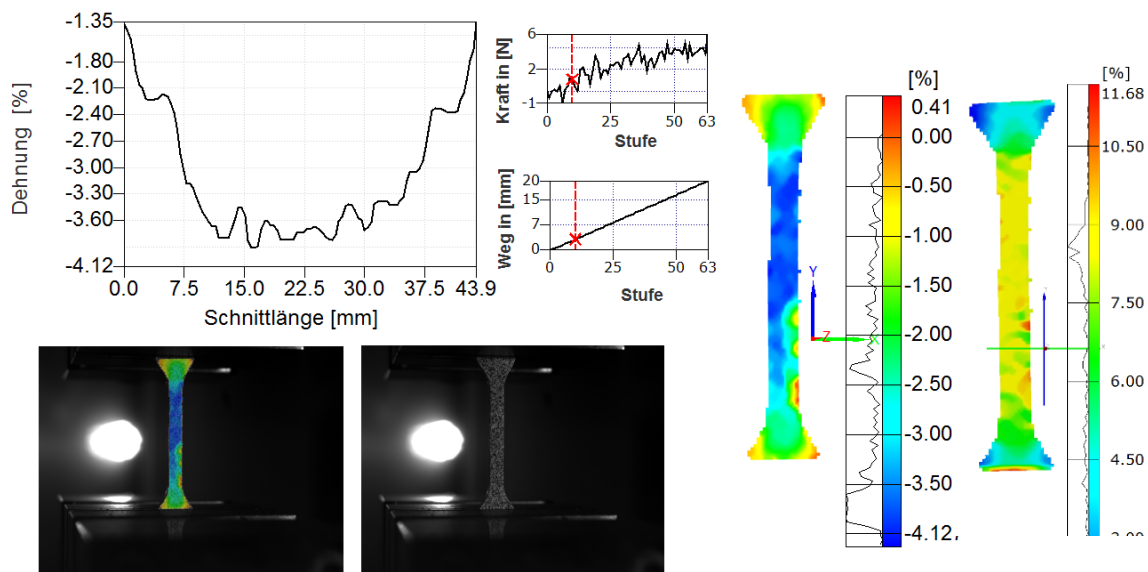


Abbildung 2.19: Elastomer Weicon Urethan 45 bei ε_y 10%.

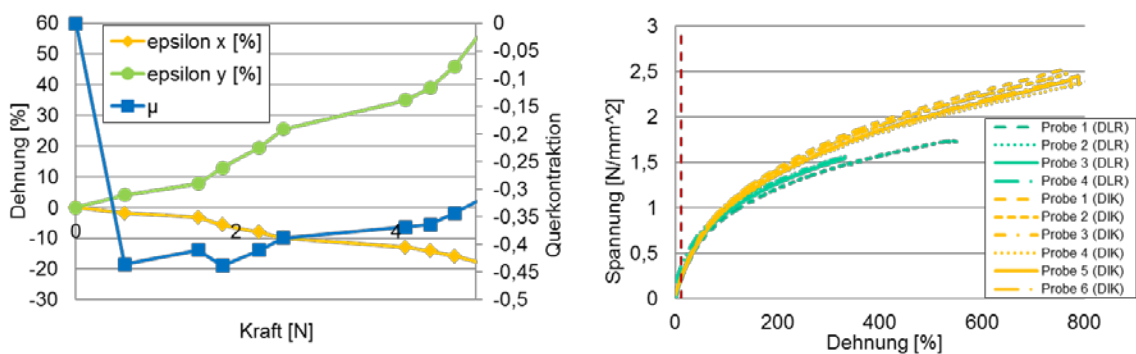


Abbildung 2.20: Messergebnisse Weicon 45

Für das Elastomer Weicon 45 konnten folgende Daten ermittelt werden:

- $\mu_{10\%} = -0,44$,
- E-Modul = $1,7 \text{ N/mm}^2$, $s = 8,9\%$,
- bis zu 800% Dehnung erreichbar.

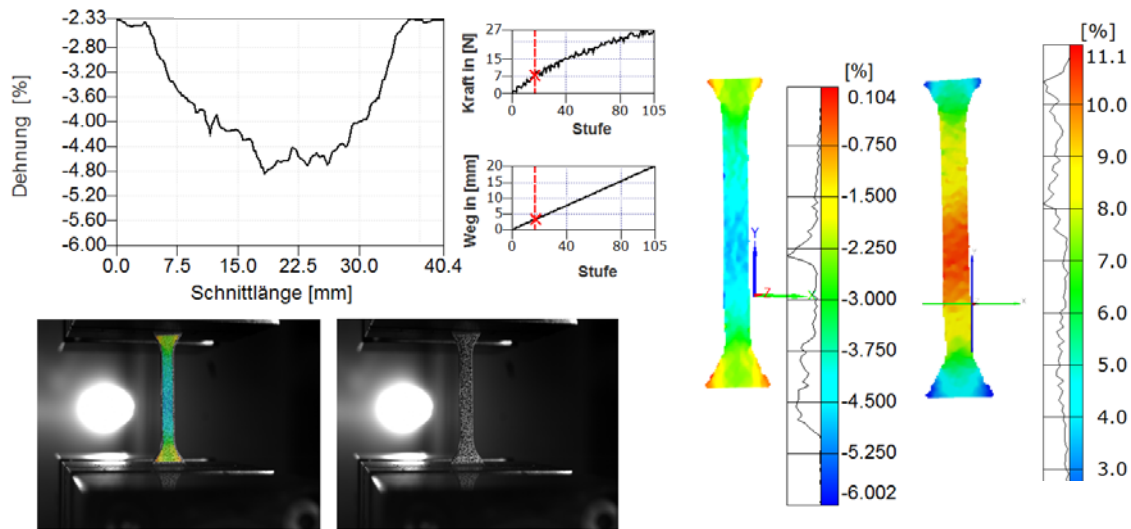


Abbildung 2.21: Elastomer Weicon Urethan 80 bei ε_y 10%

Für das Elastomer Weicon 80 konnten folgende Daten ermittelt werden:

- $\mu_{10\%} = -0,44$,
- E-Modul = $4,1 \text{ N/mm}^2$, $s = 1,8\%$,
- bis zu 300% Dehnung erreichbar.

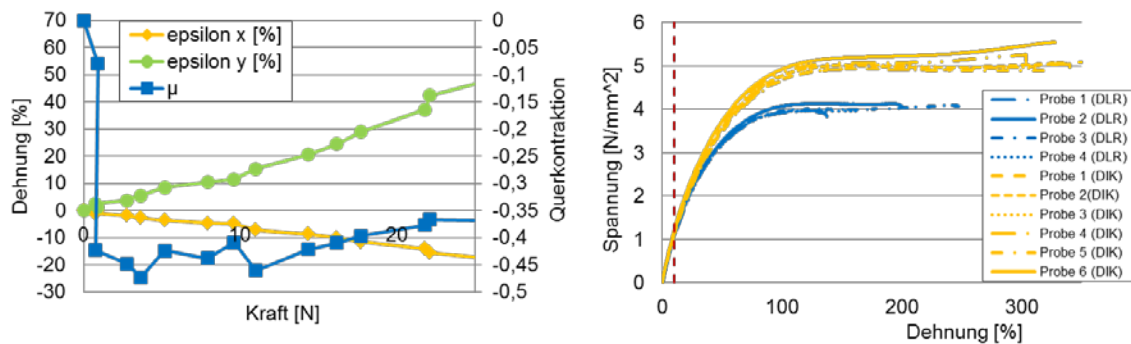


Abbildung 2.22: Messergebnisse Weicon 80

Alternativ wurden folgende Hautmaterialien untersucht:

- EPDM: E-Modul = $4,5 \text{ MPa}$, $s = 6,5\%$, $\varepsilon_{\max} = 220\%$,
- Silikon Elastosil ungetempert: E-Modul = $3,2 \text{ MPa}$, $s = 15,6\%$, $\varepsilon_{\max} = 310\%$,
- Silikon Elastosil getempert: E-Modul = $2,9 \text{ MPa}$, $s = 18,1\%$, $\varepsilon_{\max} = 240\%$.

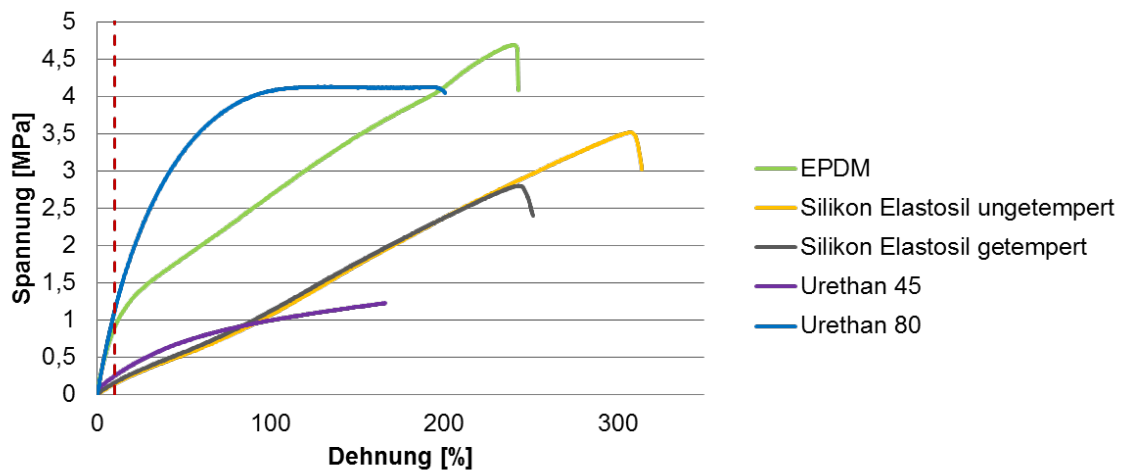


Abbildung 2.23: Spannungs-Dehnungskurven der alternativen Hautmaterialien.

Messunsicherheiten ergaben sich aus der Beschaffenheit der Proben

- da Probenoberflächen nur schwer beschichtbar (Trennmittel) (a)
- und Lufteinschlüsse im Material (b) vorliegen können.

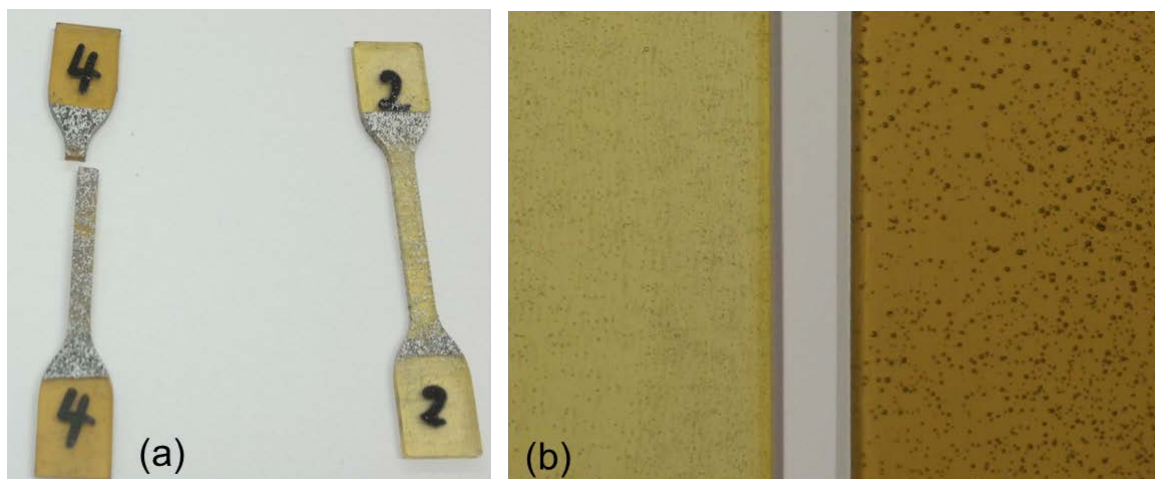


Abbildung 2.24: Beschaffenheit untersuchte Prüfkörper.

Es erfolgte die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften (E-Modul, Zugfestigkeit, Dehnung, Querkontraktion) von potenziellen Kontur gebenden Materialien nach DIN EN ISO 1798 (Weichschäume) für

- Polyethylen-Schaum Trobloc 45N (Gaugler&Lutz)
 - Dichte 45 kg/m^2
 - Zugfestigkeit $>240 \text{ kPa}$
 - Bruchdehnung $>110\%$
 - Shore-Härte A 46
- Polyurethan-Schaum AstiTech 150F (Beil)
 - Dichte 200 kg/m^2

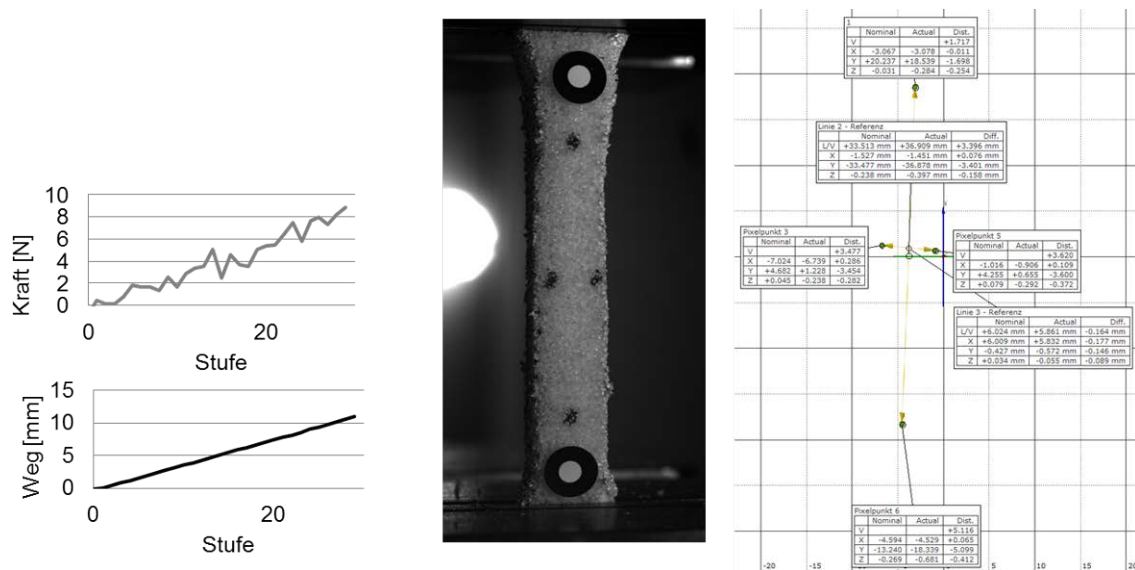


Abbildung 2.25: Vermessung Astitech 150F

Ein Vergleich der beiden Schaum-Werkstoffe ist unten dargestellt. Es konnten folgende Werte ermittelt werden:

- AstiTech 150F:
 - E-Modul: 0,3MPa,
 - $s = 5,2\%$,
 - $\epsilon_{\max} = 90\%$,
 - $\mu_{10\%} = -0,27$
- PE-Trobloc:
 - E-Modul: 0,2MPa,
 - $s = 10,1\%$,
 - $\epsilon_{\max} = 140\%$

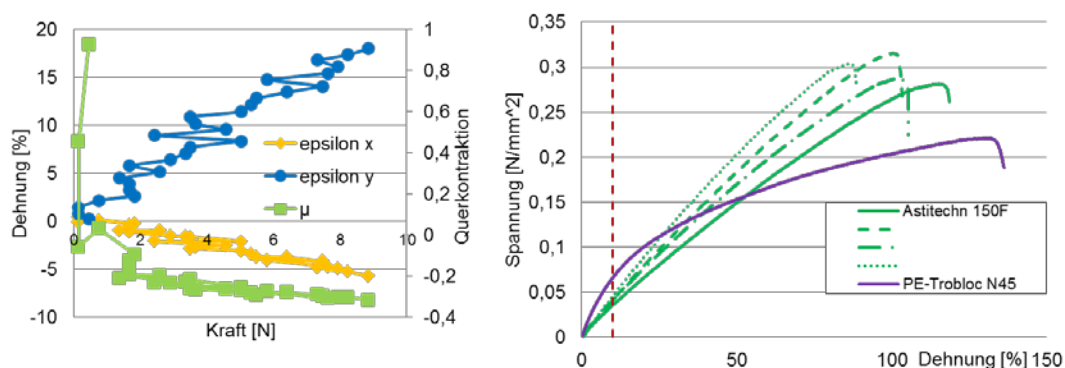


Abbildung 2.26: Messergebnisse AstiTech und PE-Schaum

Mögliche Fehler in den Messergebnissen könnten entstehen aus:

- Probengeometrie (a)
- Versagen an Schnittstellen (b)
- Inhomogenität /Gradientenwerkstoff (c, d)

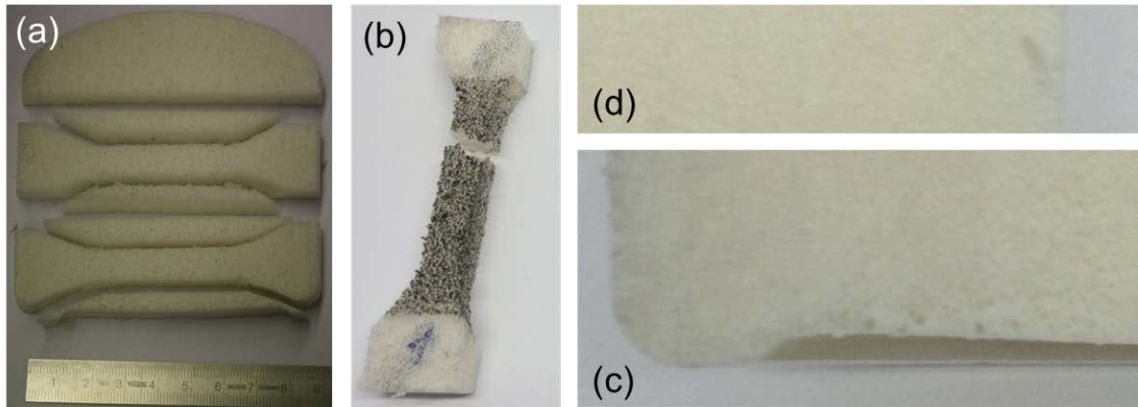


Abbildung 2.27: Darstellung möglicher Fehlerquellen in den Messungen.

Zum Einfluss der Umwelteinflüsse wurden folgende Varianten untersucht und getestet:

- Materialien
 - Weicon Urethan 80
 - Weicon Urethan 45
 - Silikon ungetempert
- Salzgehalt
 - z. T. reduzierte Spannungen,
 - höhere erreichbare Dehnungen,
 - Eine Korrelation zwischen der Höhe des Salzgehaltes und der erreichbaren maximalen Spannung bzw. Dehnung konnte nicht ermittelt werden
- Minusgrade
 - z. T. Erhöhung der erreichbaren Spannungen (Glasübergangstemperatur)
 - maximale Dehnungen vergleichbar.

Die Ergebnisse sind in der Übersicht Abbildung 2.28 und Abbildung 2.29 dargestellt.

	Kraft [N]	mech. Spannung [N/mm ²]	Weg [mm]
Weicon Urethan 45			
nicht gealtert	10	1,7	181
aged 27% RT/-5C	17/22	2/2,6	311/180
aged 1,7% RT/-5C	15/17	1,7/1,9	294/179
Weicon Urethan 80			
nicht gealtert	40	4,1	77
aged 27% RT/-5C	30/...	3,5/...	87/...
aged 1,7% RT/-5C	27/67	3,1/7,7	68/116
Silikon Elastosil:			
nicht gealtert	30	3,2	114
aged 27% RT/-5C	56/65	6,5/7,5	154/151
aged 1,7% RT/-5C	54/62	6,2/7,1	144/188

Abbildung 2.28: Untersuchte Varianten und Ergebnisse.

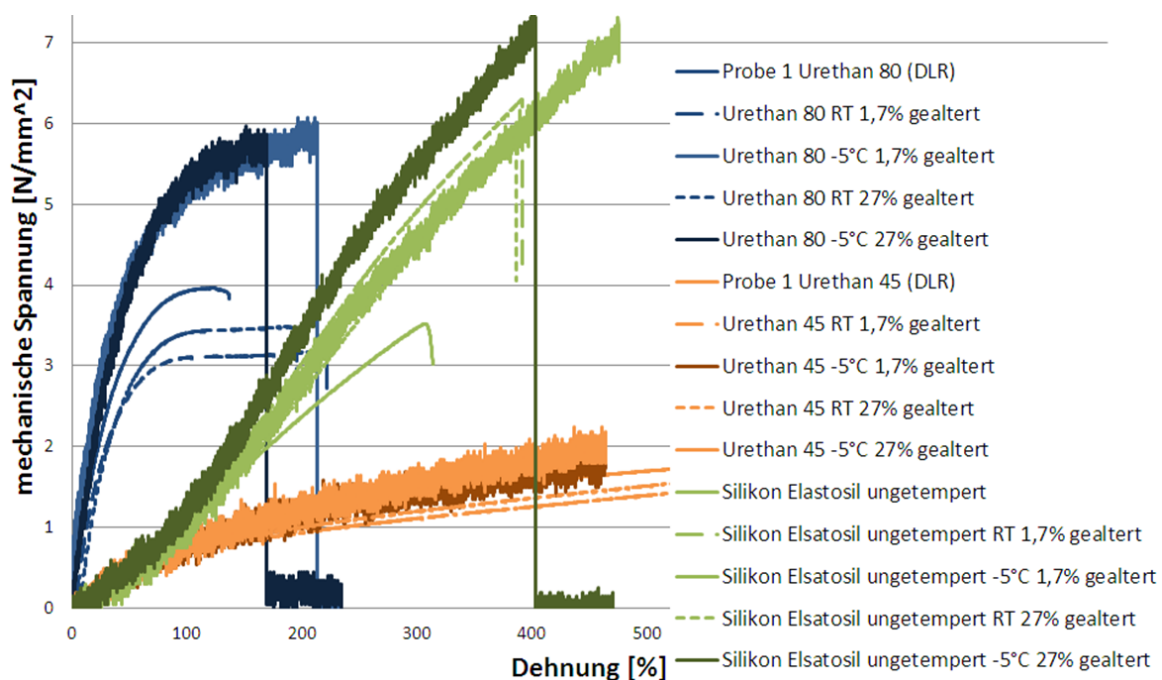


Abbildung 2.29: Spannungs-Dehnungskurven der Hautmaterialien unter Umwelteinfluss.

Als Material zur Verstärkung der Urethanhaut im Bereich der Einspannung wurde zusätzlich die Einbettung von GFK-Matten untersucht:

- Probengeometrie: Dicke: 5mm, freie Länge: 50mm, Breite: 50mm;
- Maximale Kraft: 460N

- Maximaler Weg: 67mm = 175% (Rein Material: Weicon80: ~120%, Weicon45: ~600%)

Ergebnis: kumulatives Versagen an Poren. Reißt z.T. auch durch das GFK-Gewebe.

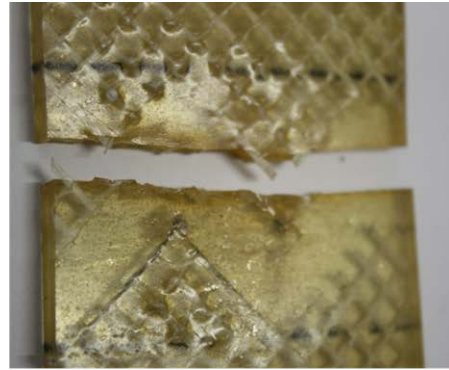
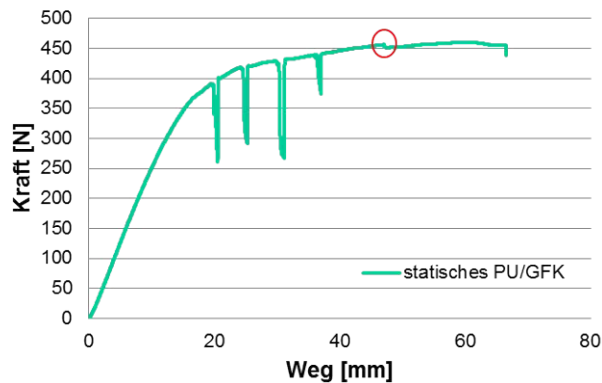


Abbildung 2.30: Untersuchung der Einspannung von PU-Material.

Weiterhin war die Untersuchung der Grenzbereiche der einzelnen Materialien von Interesse, um eine möglichst gute Anbindung der einzelnen Materialien zueinander garantieren zu können. Eine Übersicht ist in Abbildung 2.31 dargestellt.

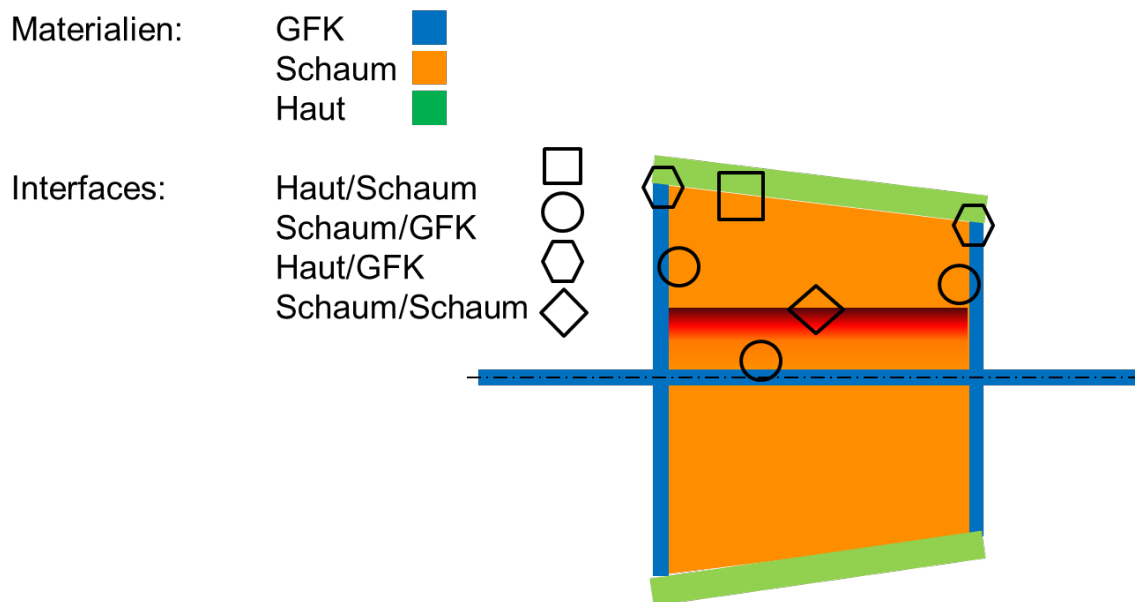


Abbildung 2.31: Übersicht über Material-Interfaces.

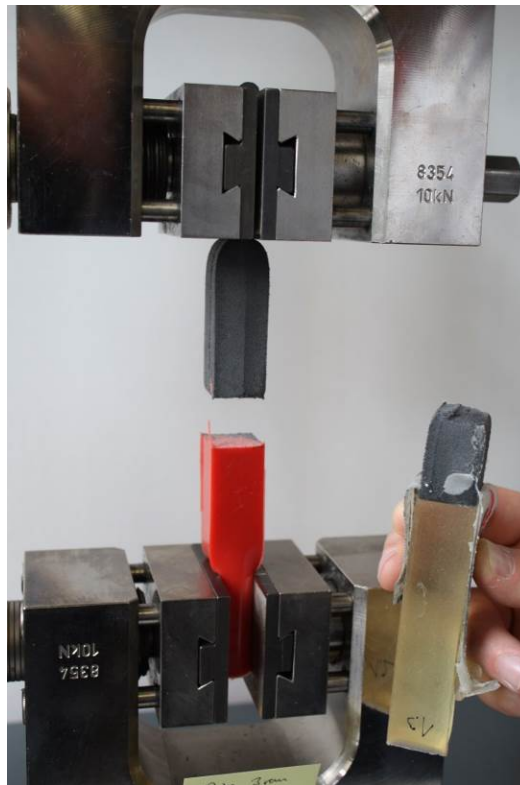


Abbildung 2.32: durchgeführter Versuch zum Vergleich der Anbindungsfestigkeit von PE-PU und PE-Silikon.

Es zeigte sich, dass die Verbindung PU-PE eine höhere Festigkeit besitzt als die ebenfalls untersuchte Silikon-PE Verbindung. Aufgrund der Materialuntersuchungen und Ergebnisse bezgl. Dehnbarkeit, Anbindungsfestigkeit und Weiterreißfestigkeit wurde in Abstimmung mit den Partnern das PU-Material Weicon 45 als Hautmaterial für den flexiblen Teil gewählt.

2.1.3 Komponentenversuche

Der Strukturversuch im Teststand diente der Prüfung der Materialkombination in ähnlicher Geometrie wie das finale flexible Element. Die Dauerversuche wurden bei zyklischer Belastung durchgeführt. Der Aufbau ist in Abbildung 2.33 dargestellt. Die aufgebrachte Verformung entspricht dabei in FE-Simulationen bzw. analytisch ermittelten Verformungen, auf Basis der verfügbaren hydrodynamischen Lasten.

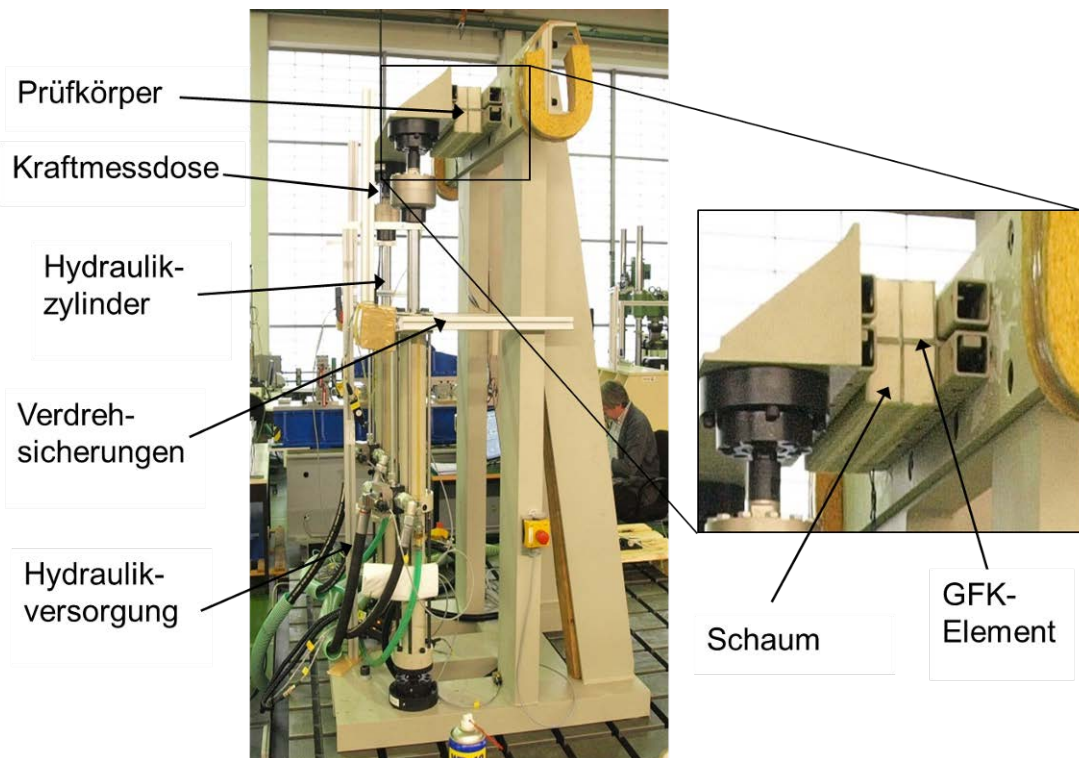
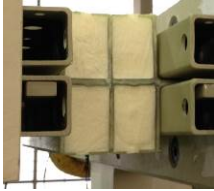


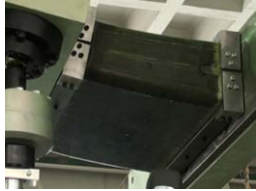


Abbildung 2.33: Teststand für Struktur-/Komponentenversuche.

Die Versuche wurden mit einer wechselnden Belastung durchgeführt, wobei die Verformung durch den Freigang der eingesetzten Kugelgelenke auf $\pm 20^\circ$ beschränkt ist. Die maximal im Versuch erfolgte Auslenkung beträgt $\pm 16^\circ$. Alle Komponentenversuche wurden im Rahmen einer Masterarbeit [17] durchgeführt und detailliert ausgewertet.

Die Komponentenversuche wurden schnellst möglich vorbereitet und durchgeführt, nachdem die Simulation des Strukturverhaltens aufgrund von fehlenden Eingangsdaten wie z.B. exakten Druckverteilungen für die Belastung des Bauteils sowie Materialkennwerte der verwendeten PU-Haut und des PU-Schaums nicht zielführend erschien. Auch zur Beantwortung der spezifischen Fragestellungen bezüglich der Festigkeit von z.B. Anbindungsbereichen der einzelnen Materialien und Komponenten untereinander war die Inbetriebnahme des Teststands und die Durchführung der Komponententests die einzige Möglichkeit verlässliche Aussagen in einer kurzen Zeit zu erreichen. Nach Inbetriebnahme des Teststands wurde daher die Entwicklung des flexiblen Flossenteils maßgeblich durch die Strukturversuche im Teststand vorangetrieben, um verschiedene Materialkombinationen, Anbringungs- und Verbindungstechniken sowie das allgemeine Strukturverhalten direkt untersuchen und vergleichen zu können. In dem verfügbaren zeitlichen Rahmen wurde die maximal mögliche Anzahl Wechsellastzyklen durchgeführt, um eine Bewertung des Strukturentwurfs durchführen zu können. Eine Übersicht der geprüften Prüfkörper ist in Tabelle 2.1 und Abbildung 2.40 gegeben.

Tabelle 2.1: Übersicht der Prüfkörper NEWA1, NEWA 2 und NEWA 3.

NEWA 1	NEWA 2	NEWA 3	NEWA 4
			
Aufbau/Betrieb:			
<ul style="list-style-type: none"> • Wechsellastbetrieb 1Hz, $\pm 8^\circ$, $\pm 27\text{mm}$ • GFK-Mittelebene: konstant 10mm • Integral gefertigte L-Winkel • Schaummaterial: AStiTech150F • Haut: keine • Sensorik: Weg und Kraft der Prüfzylinder • Erreichte Zyklenzahl: 2.201×10^5 	<ul style="list-style-type: none"> • Wechsellastbetrieb 1Hz, $\pm 8^\circ$ • GFK-Mittelebene: 6,25mm auf 4,6mm abnehmend • Integral gefertigte L-Winkel • Schaummaterial: AStiTech150F & PE-TroBloc 45 • Haut: keine • Sensorik: Weg und Kraft der Prüfzylinder sowie DMS auf der Mittelebene (Anordnung s. Abbildung 2.38) • Erreichte Zyklenzahl: 3.705×10^5 	<ul style="list-style-type: none"> • Wechsellastbetrieb 1Hz, $\pm 8^\circ$ • GFK-Mittelebene: 5,2mm auf 3,7mm abnehmend • Separat gefertigte L-Winkel, aufgeklebt und an der Einspannung am Teststand fixiert • Schaummaterial: PE-TroBloc 45, mit Einfräsungen (s. Abbildung 2.43) • Haut: PU Weicon 45 • Sensorik: Weg und Kraft der Prüfzylinder • Erreichte Zyklenzahl: 2.201×10^5 	<ul style="list-style-type: none"> • Wechsellastbetrieb 1Hz, $\pm 16^\circ$, $\pm 50\text{mm}$ • GFK-Mittelebene: 15,6mm auf 13,3mm abnehmend • Separat gefertigte L-Winkel, aufgeklebt und an der Einspannung am Teststand fixiert • Schaummaterial: PE-TroBloc 45, mit Einfräsungen (s. Abbildung 2.43) • Haut: PU Weicon 45 • Haut ist umlaufend geschlossen/das gesamte Element ist vergossen • Sensorik: Weg und Kraft der Prüfzylinder • Erreichte Zyklenzahl: 2.201×10^5
Ziel:			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Festigkeit des Schaums AstiTech150F 2. Anbindung an Glasfaser 3. Festigkeit der Glasfaser-Mittelebene 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Direkter Vergleich der Schäume PE-TroBloc 45 und AstiTech150F 2. Anbindung an Glasfaser 3. Festigkeit der Glasfaser-Mittelebene 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Test der Anbindung der Haut auf dem PE-TroBloc 45 Schaum 2. Test der Schaumfestigkeit bei fixierten L-Winkeln 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Test der Bauweise und Qualifikation für die Fertigung der finalen Flossen für die Erprobung am Schiff
Ergebnis:			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Risse im Schaum nach 1200 Zyklen, weitere Degradation (Abbildung 2.35) 2. Risse an den Zwickeln der Stringer, die sich im Verlauf der weiteren Prüfung ausbreiten (Abbildung 2.35) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Risse im Schaum (AstiTech) an der Stelle der Kabeldurchführung 2. Ablösen des AstiTech-Schaums vom mittleren Steg (s. Abbildung 2.39) 3. Kein Ablösen der Schäume von der Mittelebene feststellbar 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ablösen der Haut auf der Unterseite (der Seite ohne Einfräsungen des Schaums, Reparaturversuch nicht erfolgreich) 2. Schaum reißt direkt am Übergang zu den Stahlleisten, die den L-Winkel fixieren 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Abnahme der Kraftamplitude inkl. Setzprozess: 0.7kN 2. Starker Prozess des Setzens aufgrund des nicht-linearen Dämpfungsverhaltens des Schaums 3. Minimale Degradation

Mit dem ersten Prüfkörper „NEWA 1“ erfolgten die Inbetriebnahme und eine erste Bewertung der Bauweise des flexiblen Elements mit einer GFK-Mittenebene und darauf geklebten L-Stringern, die als Stege dem dazwischen liegenden Schaum stützen sollten. Als Schaumwerkstoff wurde der Schaum AstiTech 150F auf Vorschlag des Partners Baltico eingesetzt. Die Stege wurden durch Ausschneiden nachträglich hergestellt, da die GFK-Struktur vorab mit Hilfe von umwickelten Silikonkernen hergestellt worden war (vgl. Fertigungskonzept in Abbildung 2.34).

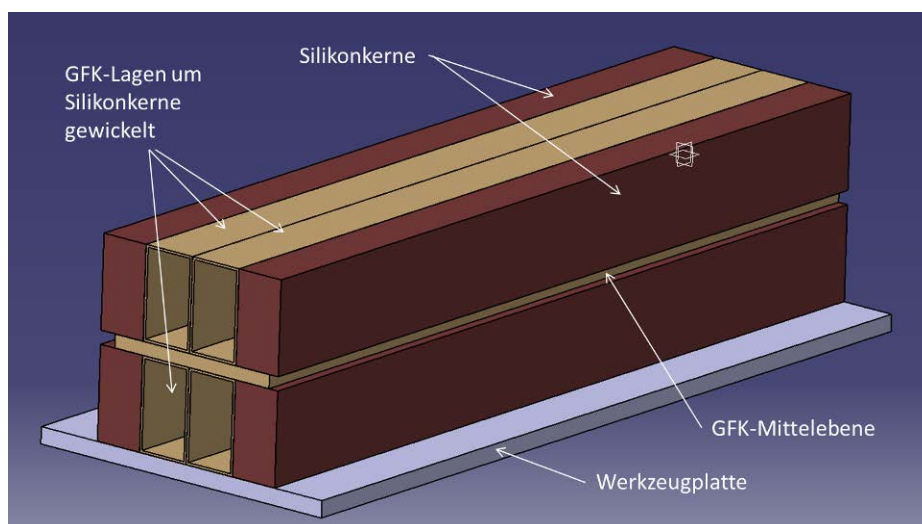


Abbildung 2.34: Fertigungskonzept für die Herstellung des Prüfkörpers "NEWA 1".

Nach dem Ausschneiden sollten verbleibende GFK-Stege eine größere Oberfläche zur Anbindung des Schaums an das GFK-Teil bieten und für eine bessere Stützung des Schaums unter Druckbelastung durch die Wasserkräfte sorgen (vgl. Abbildung 2.35a). Es wurden ARAMIS Messungen durchgeführt. In den Tests zeigte sich, dass durch die eng zusammenstehenden Stege, die Dehnung in einem kleinen Bereich des Schaums konzentriert war, sodass der Schaum nach wenigen Zyklen Risse zeigte und beschädigt wurde. Des Weiteren wurde festgestellt, dass Risse im Zwickel des aufgeklebten Stringers mit L-Stegen an der Seite der Einspannung entstehen. In der Darstellung der Kraft über der Zyklenanzahl (Abbildung 2.36) war demzufolge eine starke Abnahme der Kraft zu erkennen, die auf die Degradation des Schaums sowie der Glasfaserstruktur hinwies.

Zur direkten Bestimmung der Dehnungen wurde der zweite Prüfkörper mit DMS ausgestattet. Aufgrund der Ergebnisse zur geringen Festigkeit und schlechten Verarbeitbarkeit des Schaums Astitech150F wurde nach einer Recherche entschieden, den PE-Schaum PETroBloc45N vom Hersteller Gaugler und Lutz zu verwenden. Der NEWA 2 Prüfling wurde mit integralem L-Stringer gefertigt. Aufgrund des Zeitdrucks wurde für einen direkten Vergleich auf einer Seite der Schaum AstiTech150F verwendet, auf der anderen PETroBloc45N. Es wurden ARAMIS Messungen zu Beginn des Dauerversuchs durchgeführt. Bei der Versuchsdurchführung wurden erneut Risse in den Zwickeln der L-Stringer festgestellt. Der Schaum AstiTech150F hatte sich vom mittleren GFK-Steg ab (Abbildung 2.39) gelöst. Daraufhin wurde entschieden, den Schaum PETroBloc45 als formgebenden Schaum für die Umsetzung zu verwenden. Zur Bestimmung der Kennwerte wurden Materialversuche durchgeführt (Kapitel 2.1.2).

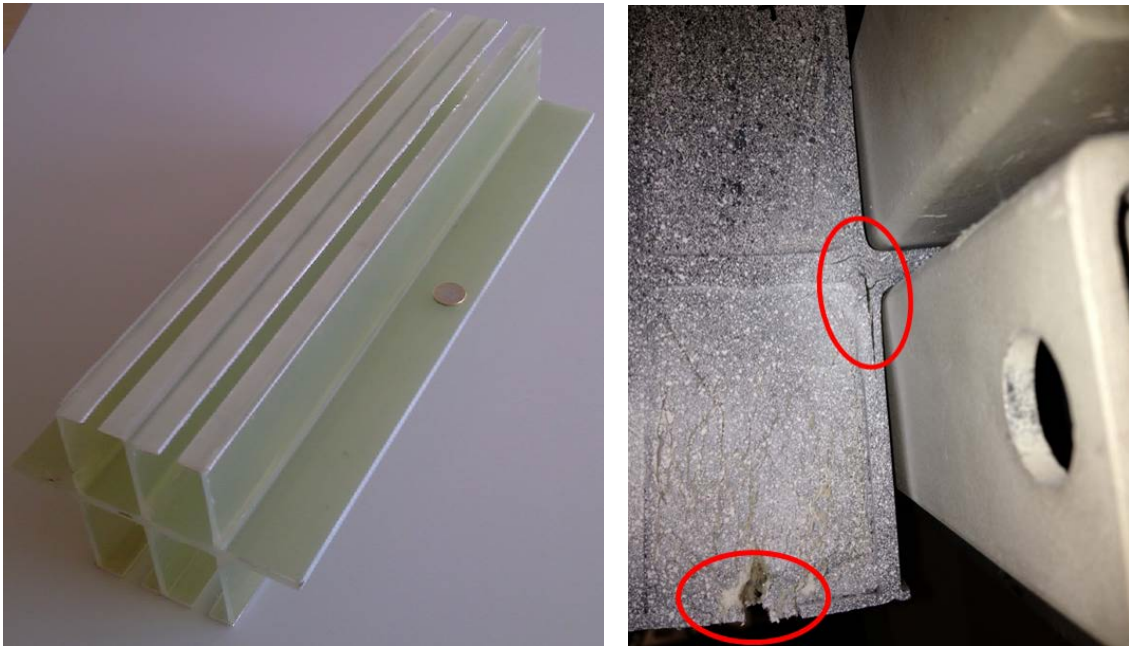


Abbildung 2.35: Prüfkörper "NEWA 1" vor dem Vergießen der Schaumkerne (links) und Schädigung des Schaums AstiTech 150F und der Glasfaserstruktur (rechts), NEWA 1.

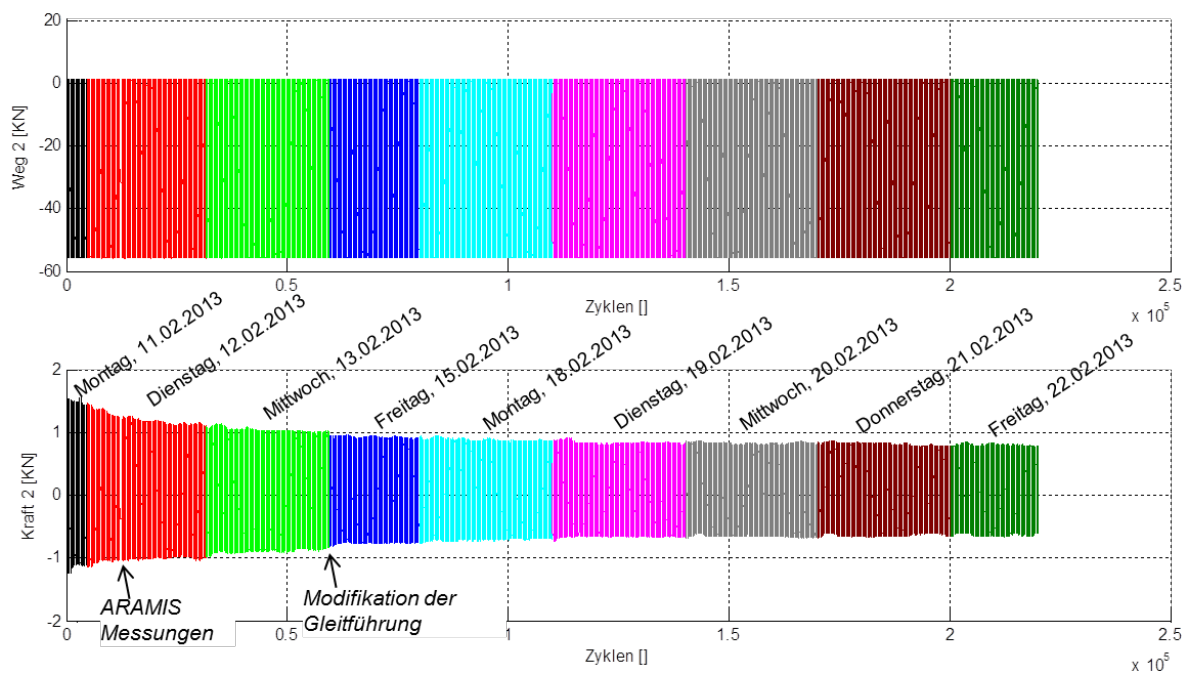


Abbildung 2.36: Kraft-Weg-Ergebnisse, NEWA 1.

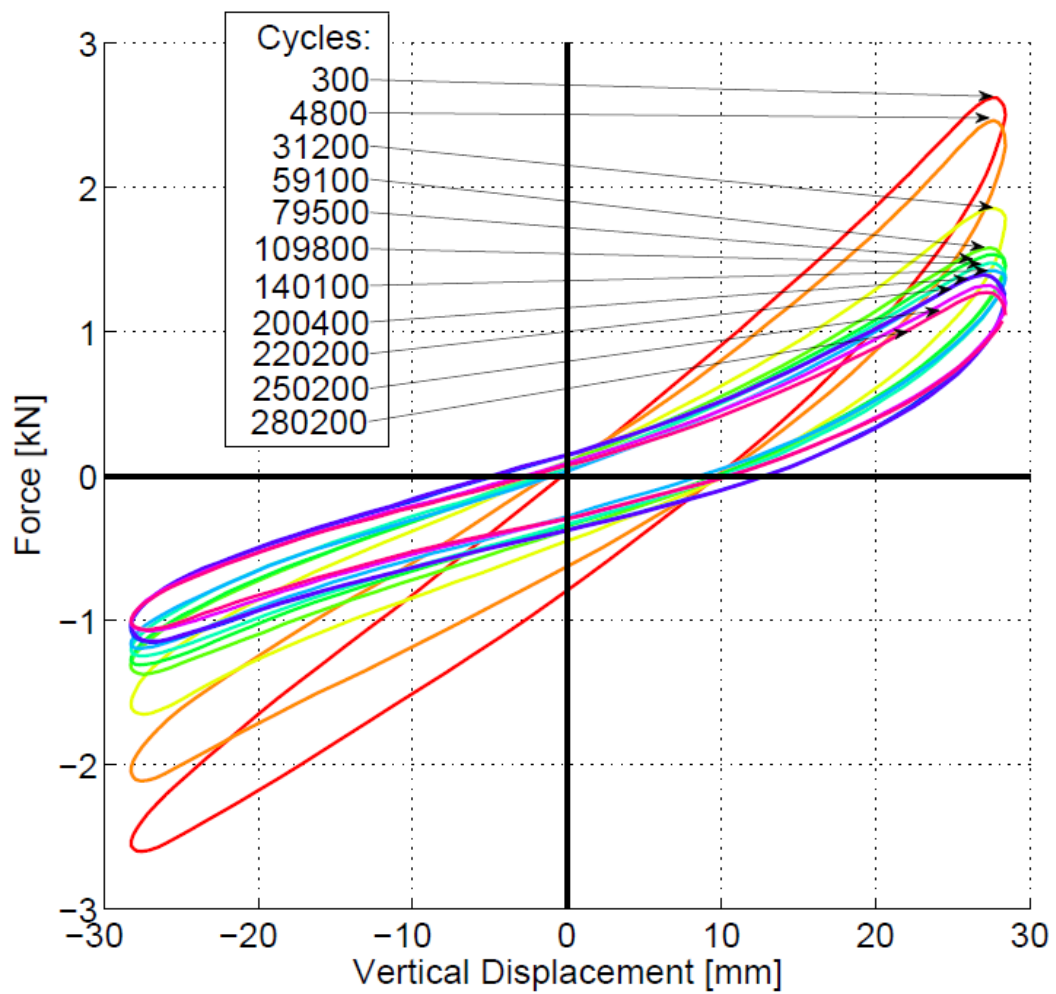


Abbildung 37: Hysterese-Kurve des NEWA 1 Prüflings.

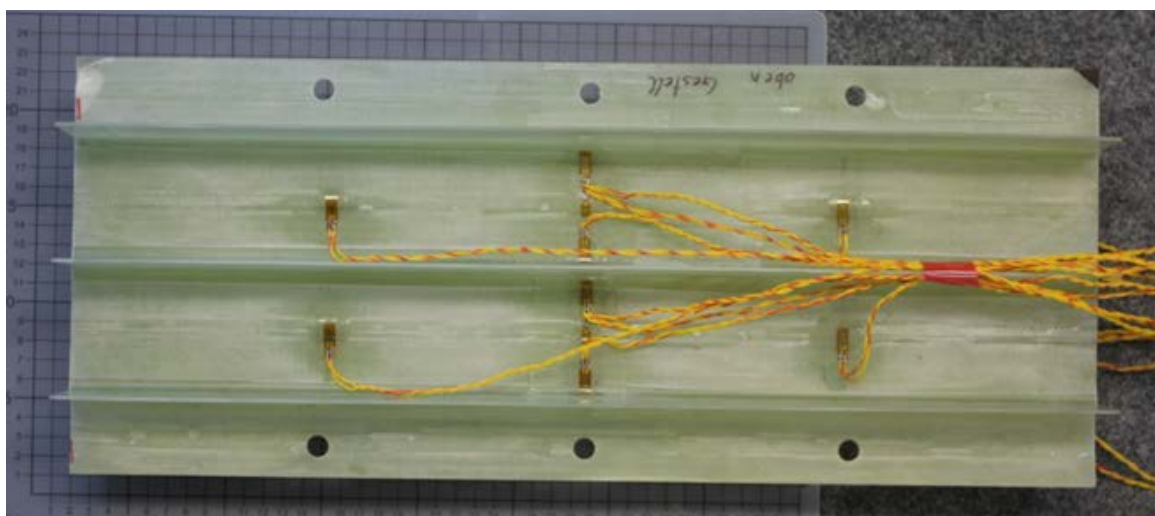


Abbildung 2.38: Position der DMS auf dem NEWA 2 Prüfkörper

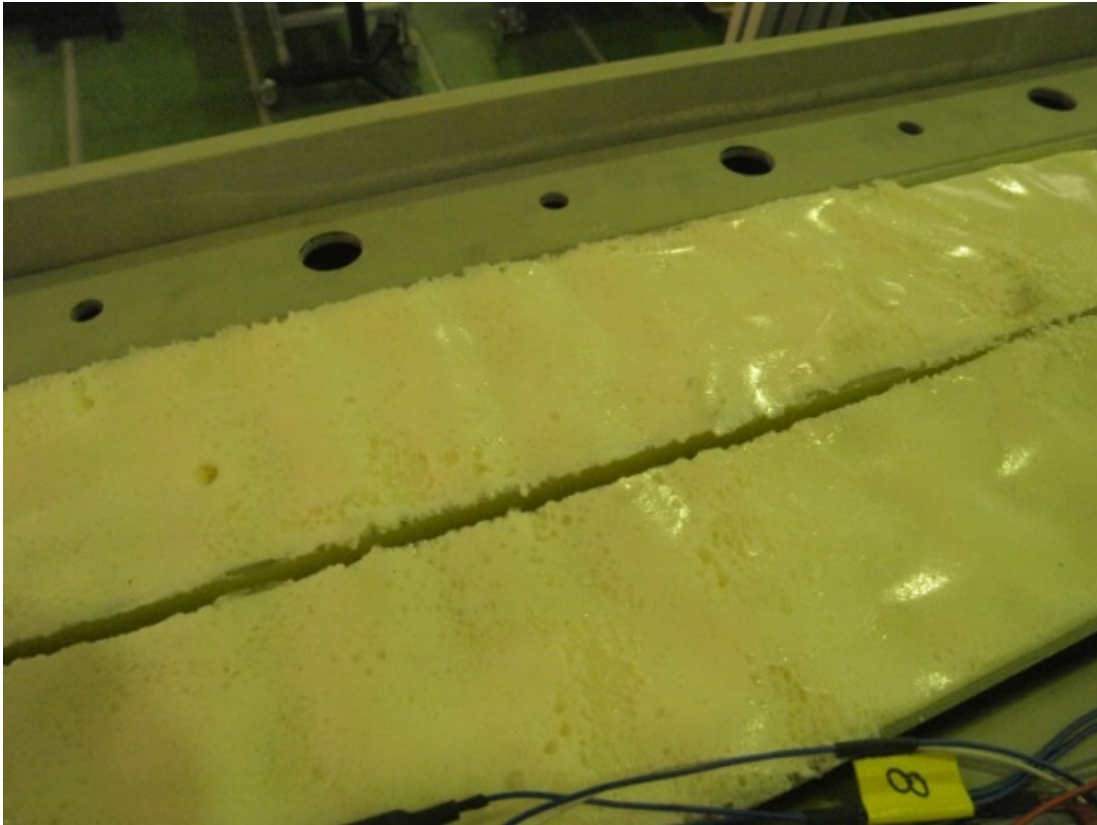


Abbildung 2.39: Ablösen des AstiTech-Schaums vom mittleren Steg, NEWA 2.

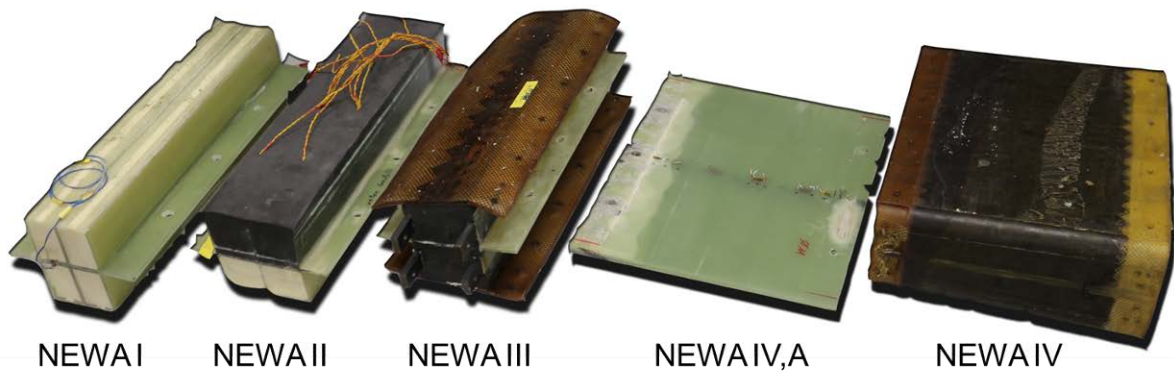


Abbildung 2.40: Übersicht über die Prüfkörper "NEWA 1" bis "NEWA 4".

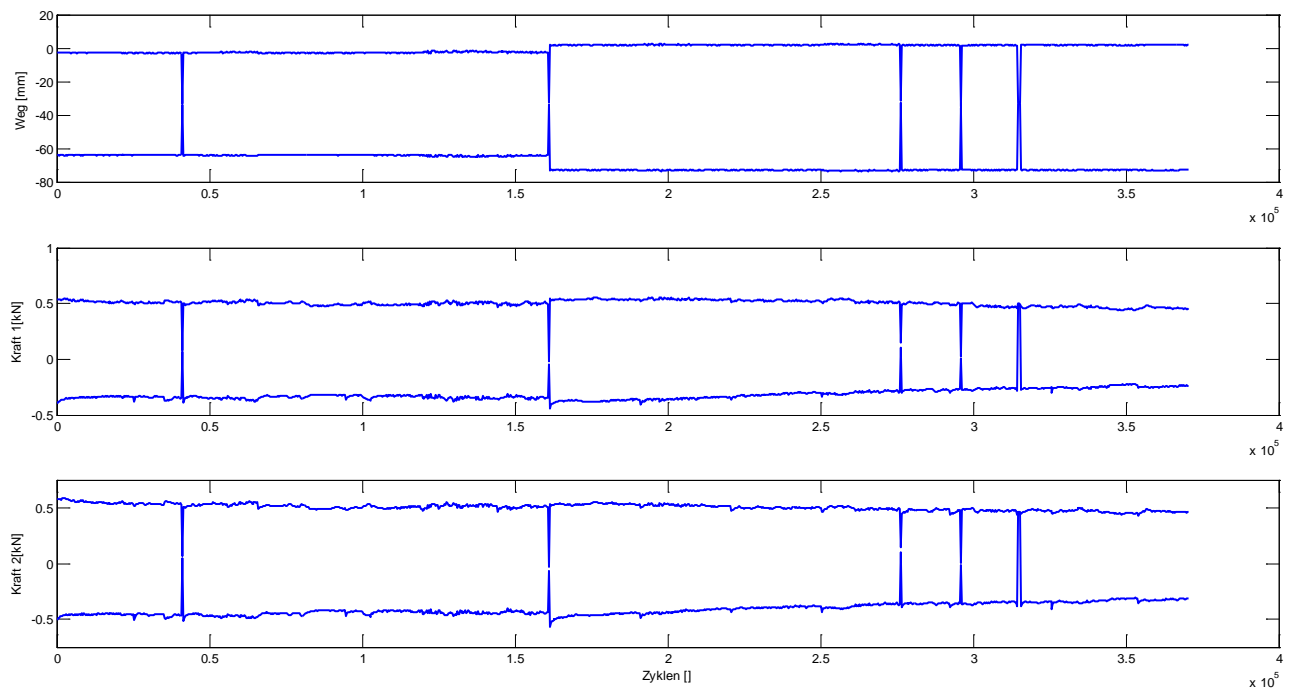


Abbildung 2.41: Kraft-Weg-Ergebnisse, NEWA 2.

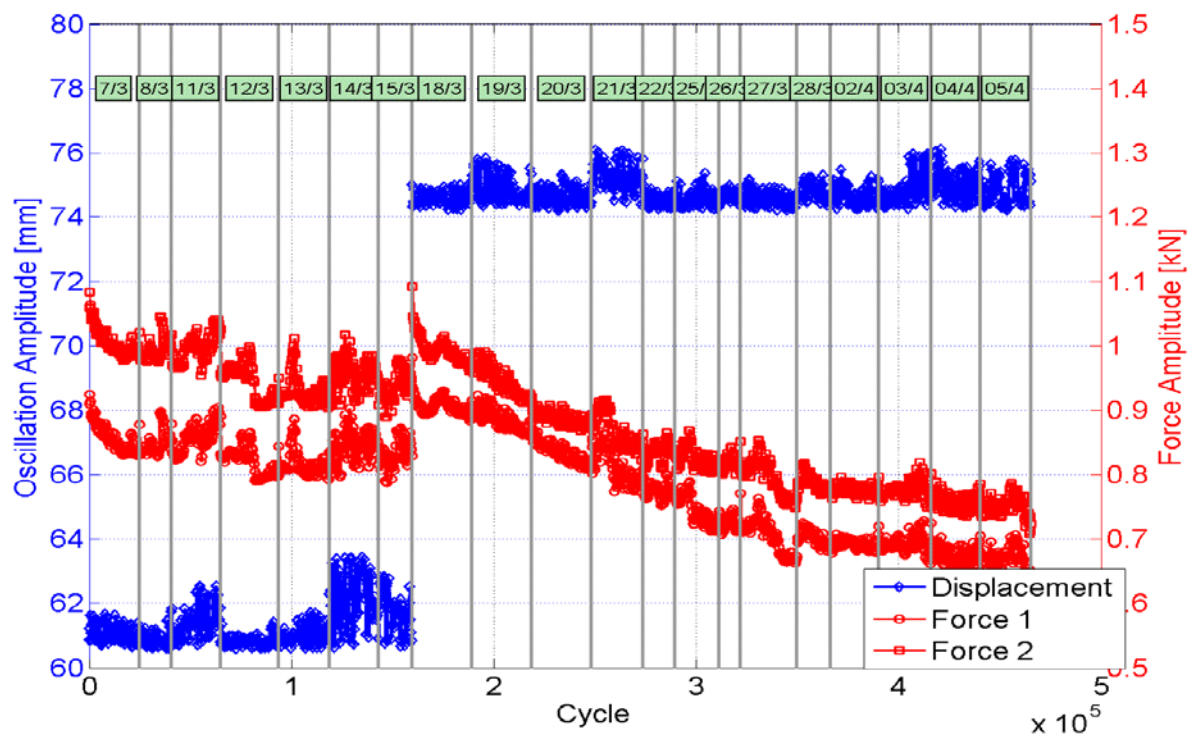


Abbildung 2.42: Kraft-Weg-Ergebnisse, Amplituden, NEWA 2.

Basierend auf den Ergebnisse aus den Prüfungen „NEWA1“-und „NEWA 2“-Prüfkörper erfolgte ein Konzeptwechsel bzgl. der Mittelstege und Stringer-Anbindung. Es wurde beschlossen, den Mittelsteg wegzulassen und im flexiblen Bereich ausschließlich Schaum für die Formgebung zu verwenden. Für eine gute Anbindung des Schaums zur PU-Haut wurden Einfräsungen in den Schaum eingebracht, um die Oberfläche zu vergrößern und eine „Verzahnung“ von Schaum und PU-Haut erreichen (vgl. Abbildung 2.44). Da der Fokus des NEWA 3-Tests auf der Erprobung des Schaums bzw. der Anbindungsflächen, d. h. GFK-Schaum bzw. PU-Haut und Schaum lag, wurde die Mittelebene dünn ausgeführt (vgl. Abbildung 2.45).



Abbildung 2.43: Einfräsungen in die PE-Schaumoberfläche für eine bessere Anbindung beim Prüfkörper NEWA 3.

- Taillierte Mittelebene
- Kein Mittel-Steg zur Stützung der Haut → homogene Dehnungsverteilung → Stützung der Haut nur durch den Schaum
- Separate Fertigung der L-Stege zum Vermeiden von Ondulation
- Verkleben der L-Stege auf der Mittelebene zur Fixierung des Elements an der Einspannung
- Verschraubung der L-Stege am Testgestell über Stahlprofile

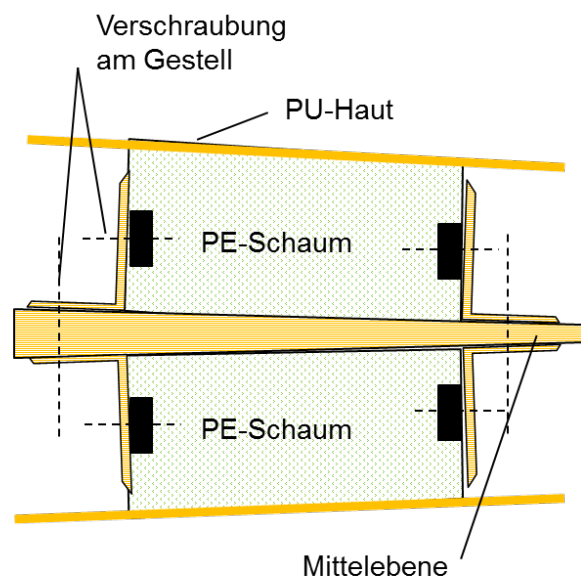


Abbildung 2.44: Kernpunkte des NEWA 3 Konzepts und Konzeptskizze.

Der Erfolg der neuen Bauweise zeigte sich in den Versuchsergebnissen des „NEWA 3“-Prüflings. Eine Ablösung des Schaums von der Glasfaser-Mittelebene konnte nicht beobachtet werden. Auf der Unterseite des Prüflings löste sich die PU-Haut vom Schaummaterial ab. Auf dieser Seite wurde das Schaummaterial allerdings auch nicht gefräst und sondern im Ur-Zustand belassen. Auf der anderen Seite (mit Einfräsungen, etwa 4mm tief mit $\pm 45^\circ$) konnte kein Ablösen des Schaums beobachtet werden. Auch die Anbringung mit nachträglich aufgeklebtem und dann verschraubtem Stringer dürfte eine Schädigung im Anbindungsbereich verhindern. Ein Reparaturversuch der abgelösten Haut auf der Unterseite mit PU-Kleber scheiterte.

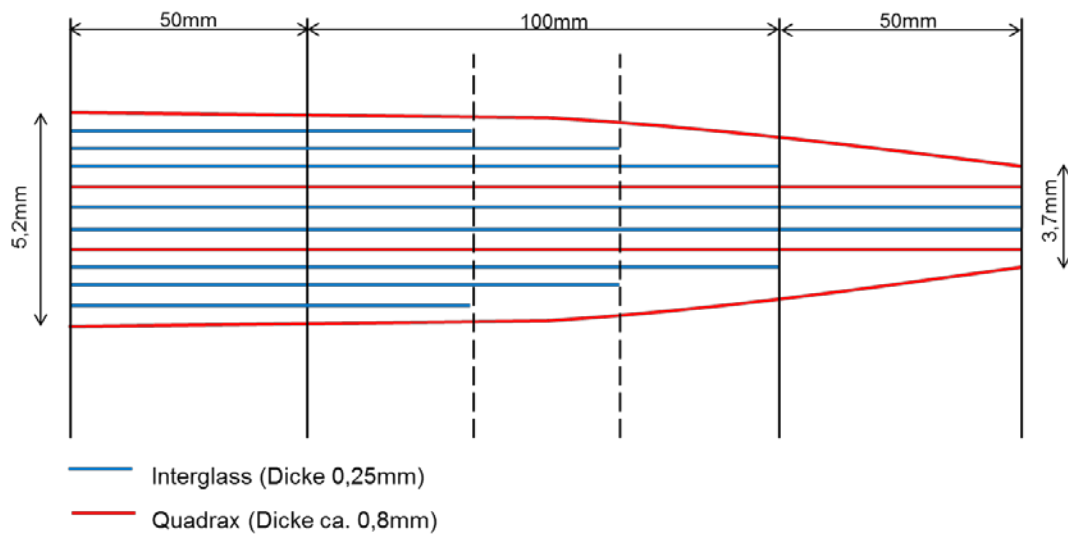


Abbildung 2.45: Lagenaufbau der Mittelebene, NEWA 3, schematisch.

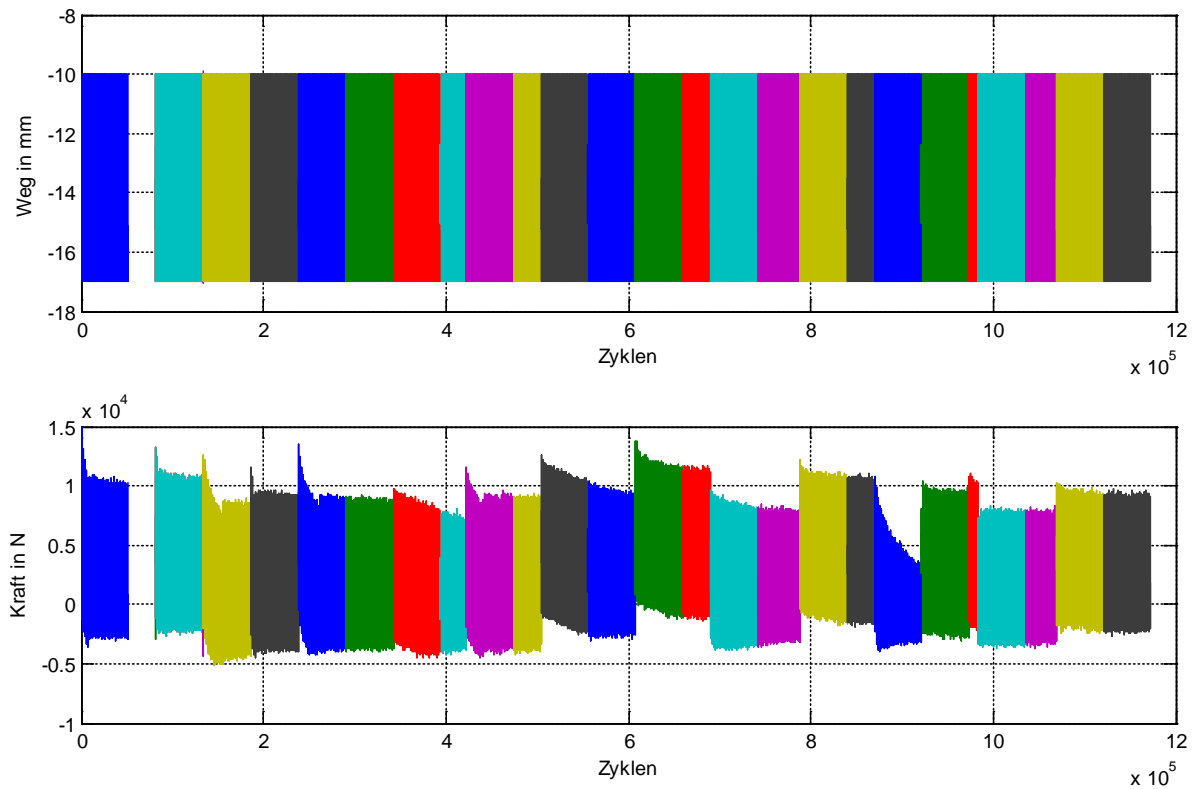


Abbildung 2.46: Kraft-Weg-Ergebnisse, NEWA 3.

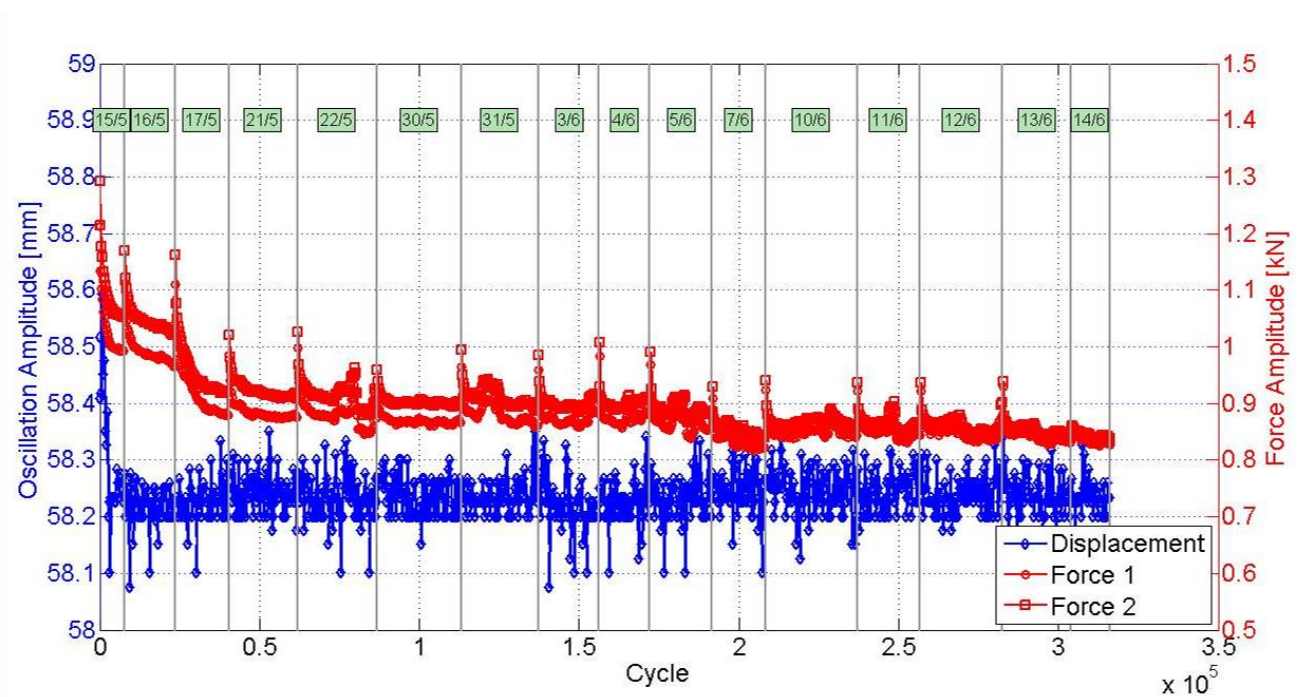


Abbildung 2.47: Kraft-Weg-Ergebnisse, Amplituden, NEWA 3.

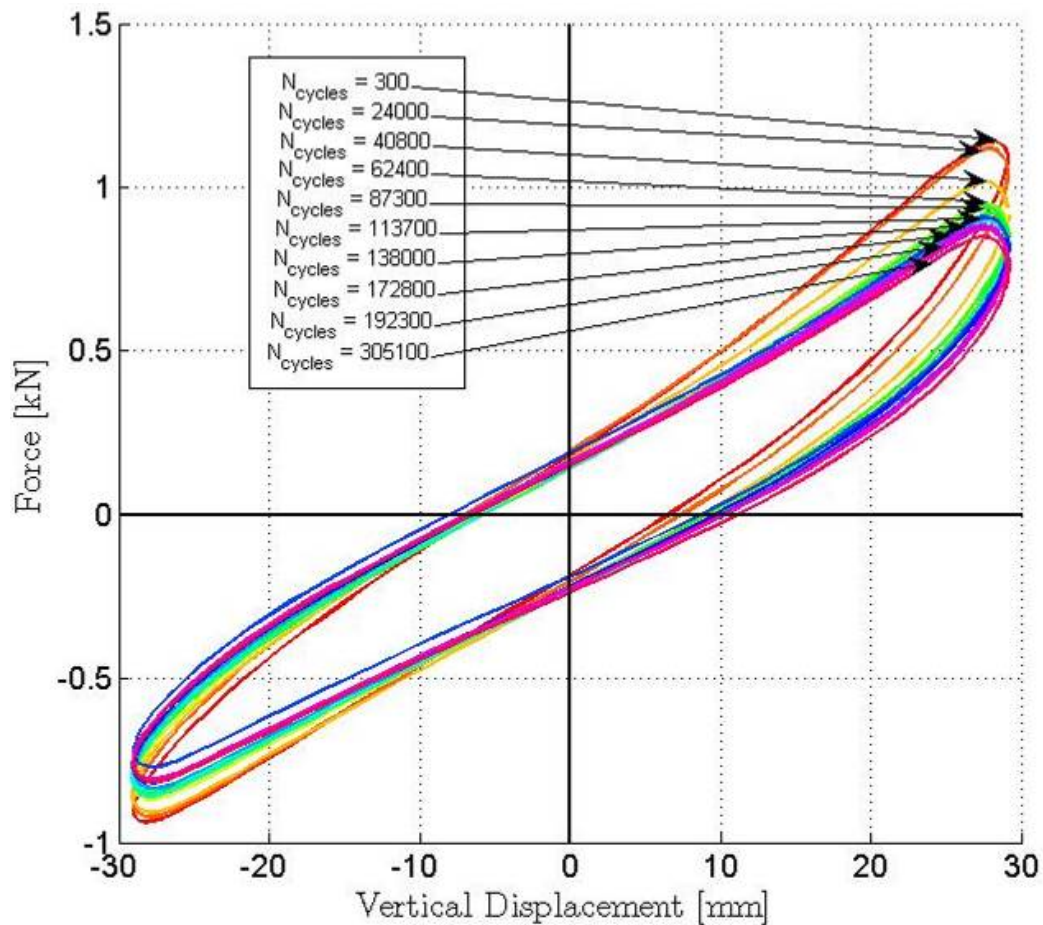


Abbildung 48: Hysterese-Kurven des NEWA 3 Prüflings.

Bei der Fertigung des NEWA 4 Prüflings waren in der Mittelebene Stellen trocken geblieben bzw. nicht vollständig durchtränkt. Es wurde daher beschlossen, einen Einzeltest an der GFK-Mittelebene ohne Schaum etc. durchzuführen. Dieser Test wird als NEWA 4a bezeichnet. Der Aufbau ist entsprechend der Auslegungen in Abschnitt 2.1.1 gewählt. Es zeigt sich, dass die Mittelebene in einem statischen Test mit bis zu $\pm 18^\circ$ nicht zum Bruch geführt werden konnte. Der Aufbau der Mittelebene wurde bestätigt und für den NEWA 4 Test beibehalten.

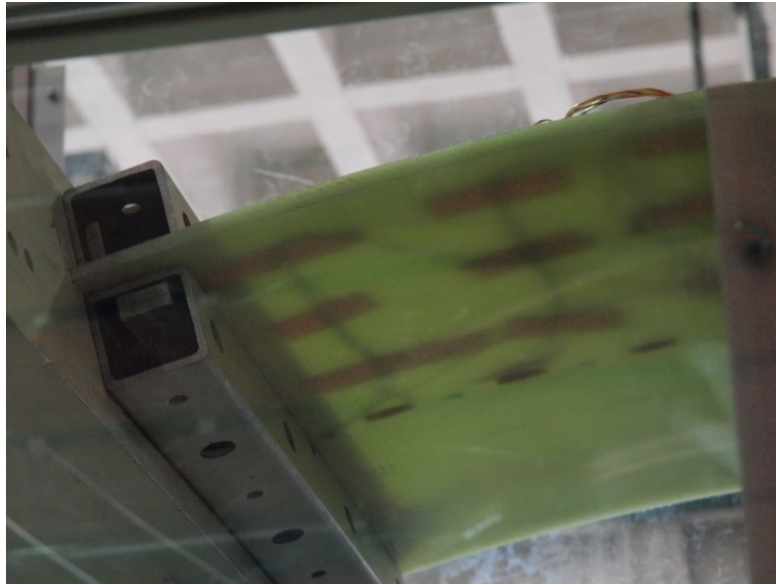


Abbildung 49: NEWA 4a, Mittelebene im Test.

Der NEWA 4 Prüfling wurde abschließend mit komplett geschlossener PU-Haut getestet. Es zeigten sich weder Ablösungen der PU-Haut von Schaumkörper noch starke Degradation in der Steifigkeit, die maßgeblich durch die Glasfaserelemente bestimmt wurden.



Abbildung 50: NEWA 4 Prüfling mit komplett geschlossener Haut im Test.

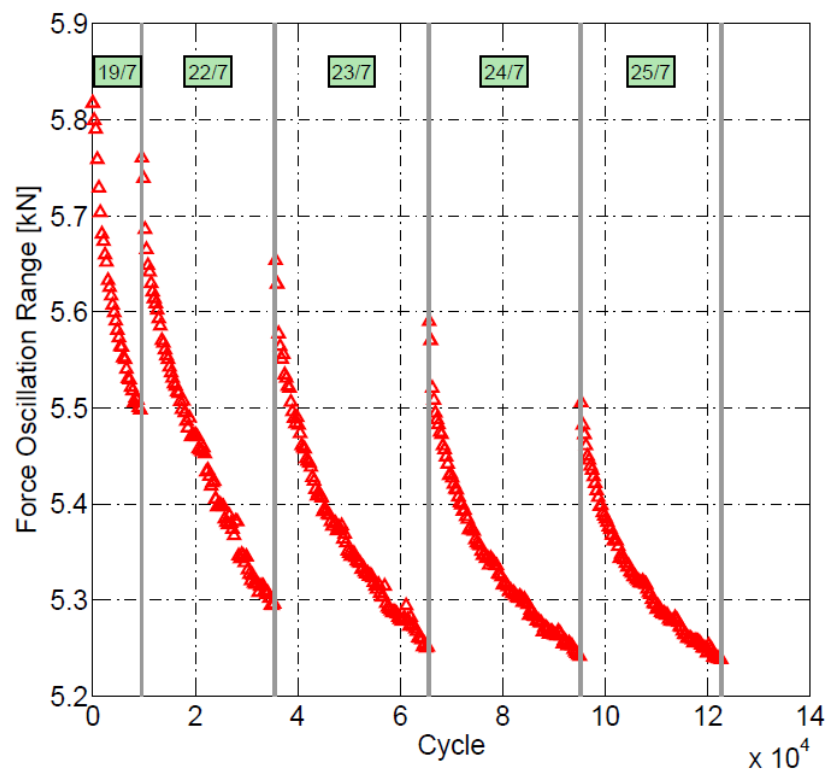


Abbildung 2.51: Kraft-Degradation über Zyklusanzahl des NEWA 4 Prüflings.

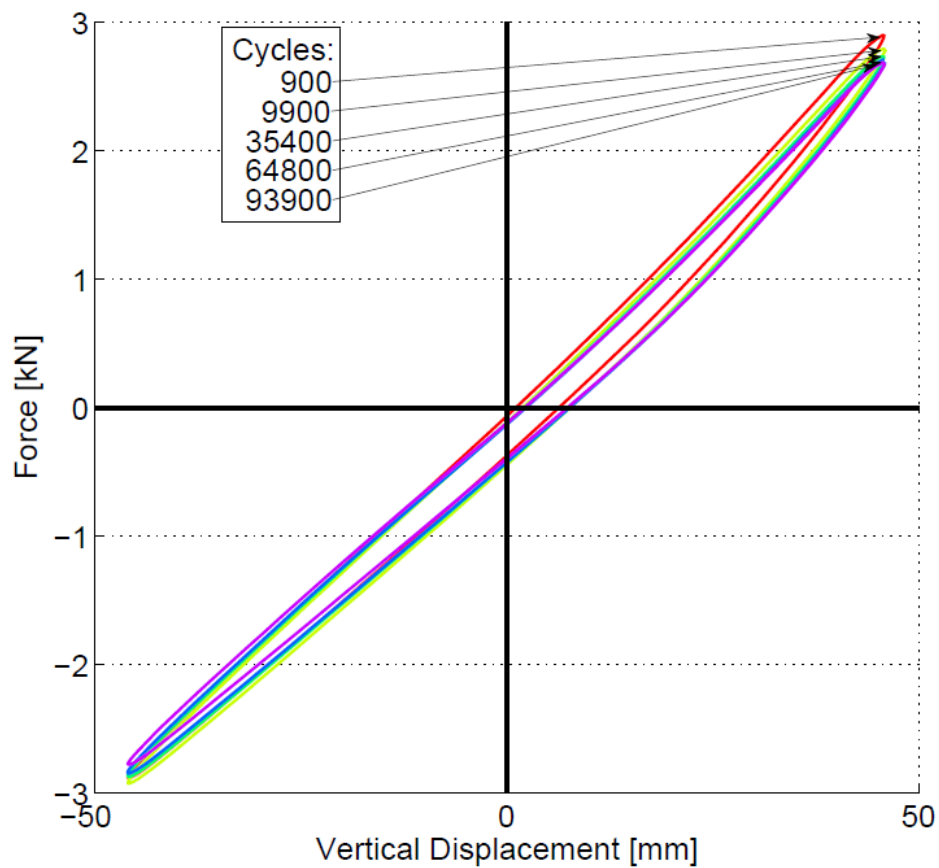


Abbildung 52: Hysterese-Kurve des NEWA 4 Prüflings.

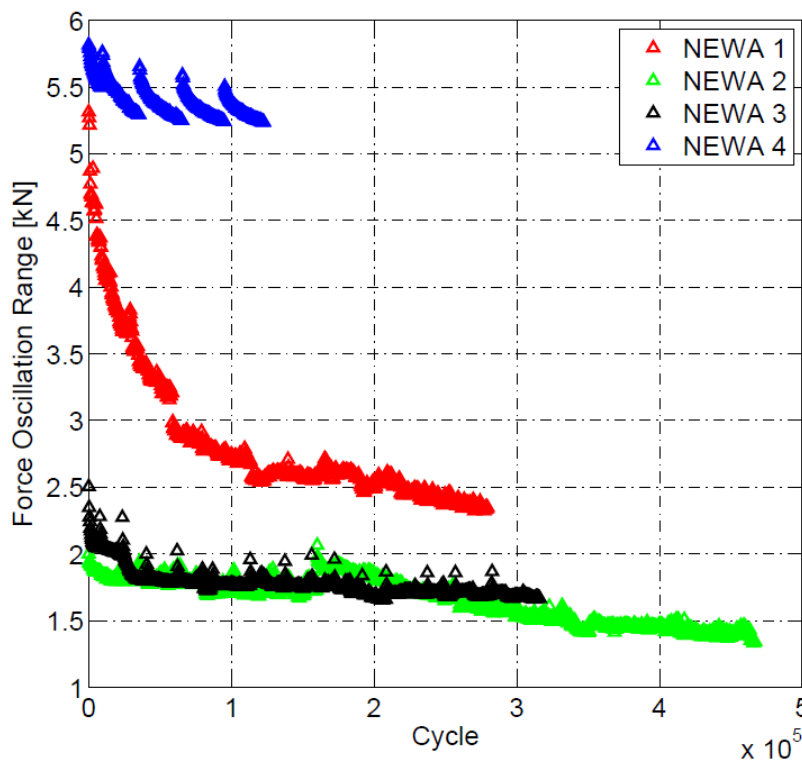


Abbildung 2.53: Vergleich der Komponententests „NEWA 1“ bis „NEWA 4“.

2.1.4 OCM-System

Durch den Einsatz neuer Materialien und Konstruktionsprinzipien war das Ermüdungs- und Schädigungsverhalten der Stabilisierungsflosse völlig unbekannt. Dies traf vor allem auf den flexiblen Flossenbereich zu, der kontinuierlichen hohen Dehnungsbelastungen ausgesetzt ist. Zusätzlich sind auch bei der, im Stabwickelverfahren hergestellten Hauptteil der Flosse weiterhin Messungen der Lasten im Betrieb notwendig, wenn zuverlässige Aussagen über deren Leistungsfähigkeit getroffen werden sollen.

2.1.4.1 Übersicht und Definition

Im Rahmen des Vorhabens gelangten hybride Verbunde mit verschiedenartigen Fasern, Schichtverbunde mit kontinuierlichen sowie mit passiv sensorischen Komponenten zum Einsatz. Durch das eingesetzte Stabwickelverfahren bei der Hauptflosse in Verbindung mit metallischen Strukturen konnten bestehende Erfahrungen erweitert und ergänzt werden. Durch die Kombination verschiedenartiger Werkstoffe in einem hybriden Verbund entstanden völlig neuartige Eigenschaftsprofile. Die Eigenschaften wurden in ersten Versuchen untersucht und werden im Einsatz überwacht und protokolliert.

Der Einsatz eines Online-Condition-Monitoring (OCM), welches den Belastungszustand der Struktur kontinuierlich überwacht und eine im Betrieb auftretende Überlastung detektieren kann, war daher zwingend erforderlich. Dazu mussten an verschiedenen Stellen der Stabilisatorflosse Dehnungssensoren zur Messung der Belastung in die Struktur eingebracht werden. Die gemessenen Dehnungen an diesen Stellen wurden mit zulässigen Werten verglichen. Bei einem Überschreiten dieser Werte, gibt das System eine entsprechende

Meldung aus. Darüber hinaus gibt das System wichtige Informationen zur Regelung der adaptiven Stabilisatorflosse aus. Das erarbeitete Konzept ist für einen Einsatz im Dauerbetrieb ausgelegt. Für die praktische Umsetzung im Projektzeitraum wurde das Konzept an die Erprobungsfahrt von sechs Monaten angepasst und weiterentwickelt. Als Messaufgaben und Randbedingungen wurden folgende Punkte definiert:

Messaufgaben

- Belastungen bzw. Überbelastung im Betrieb messen,
- Beurteilung der Schadensart und –größe (Schadensmodell erforderlich)

Randbedingungen

- Salzwasser an der Außen- und Innenseite der GFK/PU-Struktur
- Anlagerung von Feststoffen (Fouling)
- Einsatzdauer: 25 Jahre (lt. NEWA-Pflichtenheft)
- Lastspielzahl: 45·10⁶ (lt. NEWA-Pflichtenheft)
- Dehnungsbereich: < 1% (Ergebnisse aus Simulationen)

Es wurden mögliche Verfahren zur Erstellung des OCM-Systems in Tabelle 2.2 verglichen.

Tabelle 2.2: Verfahren zur Erstellung des OCM-Systems.

Verfahren	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
Eigenschwingungs-analyse	Eigenschwingungen liefern Rückschlüsse auf Zustand	mit wenigen Anregungspunkten Aussagen über gesamte Struktur	keine eindeutige Zuordnung zwischen Ursache & Wirkung
Acoustic-emission	Risswachstum, Einschläge und andere Ereignisse erzeugen messbaren Körperschall	passives System; wenige Sensoren	Schallsignale müssen bestimmten Ereignissen zugeordnet werden; Abgrenzung zu anderen Schallquellen (Antrieb etc.)
Lambwellen-basiert	aktiv erzeugte Wellen interagieren mit Schäden und erlauben deren Ortung	Schadensart, -größe, und -position bestimmbar	hoher Entwicklungsaufwand
Load Monitoring	Dehnung in kritischen Bereichen wird aufgezeichnet und darüber Aussagen zur Materialermüdung getroffen	passives System; wenige Sensor; einfache Datenauswertung	Materialverhalten muss in Dauerschwingversuchen bestimmt werden; nur lokale Überwachung
FEM-Modell	Betriebsparameter (Fahrtgeschwindigkeit, Flossenauslenkung, ...) werden aufgezeichnet und auf deren Basis mit einem FE-Modell die momentane Materialermüdung bestimmt	keine zusätzlichen Sensoren nötig	viel Erfahrung sowohl mit dem Zusammenhang zwischen Betriebsparametern und wirklicher Belastung als auch mit dem Bauteil nötig, detailliertes, verifiziertes FE Modell

Dabei wurde das Load-Monitoring ausgewählt, da es im Hinblick auf die Messaufgabe und die vorliegenden Randbedingungen am geeignetsten erschien. Mit diesem Verfahren ist die Überwachung von kritischen Bereichen, in denen hohe Wechselbeanspruchungen zu erwarten sind, möglich. In Tabelle 2.3 wurde verschiedene Sensoren verglichen und ihre Eignung bewertet.

Tabelle 2.3: Sensoren und ihre Eignung für den Einsatz in der Stabilisatorflosse

Technologie	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
Dehnmessstreifen (DMS)	Änderung des elektrischen Widerstands bei Dehnung	günstig; ausgereifte Systeme für viele Anwendungen	wenig Systeme im Bereich von 10^8 Lastspielen
Lichtwellenleiter mit Fiber-Bragg-Grating (FBG)	Dehnung des Gitters ändert reflektierte Wellenlänge	Strukturkonform in GFK; langlebiger als DMS; korrosions-resistent; kein elektrisches System in der Flosse nötig; mehrere Sensoren in einem Leiter	Temperaturkompensation nötig; neue Technologie
Piezoelektrische Keramiken (PZT)	Dehnung erzeugt elektrische Spannung	langlebig	nicht geeignet bei Quasi-statischer Belastung

Nach der Auswahl wurde die Analyseketten in Abbildung 2.54 zur Zustandsüberwachung erarbeitet. Für einen langfristigen Einsatz, wie er im Lastenheft vorgesehen ist, sind robuste faseroptische Sensoren am geeignetsten. Für die sechsmonatige Erprobungsfahrt im Projektzeitraum wurden jedoch Dehnmessstreifen (DMS) gewählt, da eine Umsetzung mit diesen kostengünstiger ist und bereits Erfahrungen mit den eingesetzten Sensoren vorliegen.

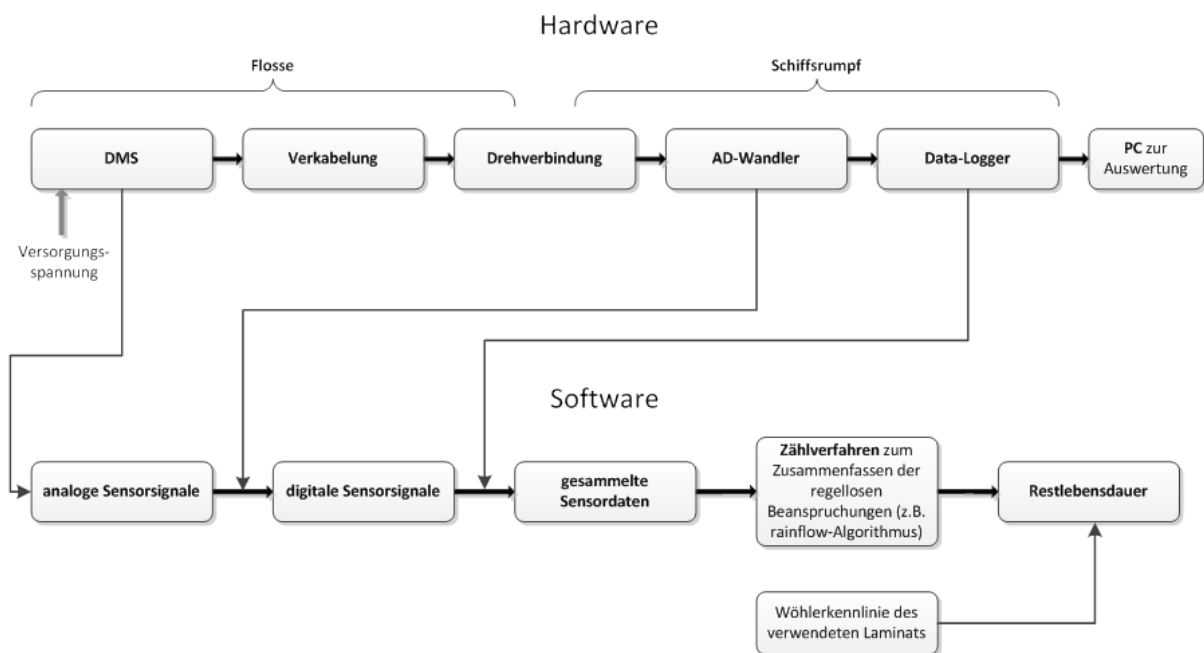


Abbildung 2.54: Analyseketten zur Zustandsüberwachung der Flosse.

Für eine einwandfreie Funktion der einzelnen Komponenten der Flosse waren wichtige Punkte zu beachten:

DMS:

- Kapselung der DMS und der elektr. Anschlüsse
- Vermeidung von Lötverbindungen (Lötstützpunkte integrieren, leitfähiger Epoxidkleber oder spezielles Lot, Steck- und Crimp-Verbindungen als Alternative)

- Abstand von neutraler Faser im Laminat so groß wie nötig (zuverlässige Messwerte) aber so klein wie möglich (minimale Ermüdung)
- Redundanz nötig um Ausfallwahrscheinlichkeit zu verringern, da Reparatur nur schwer möglich

Verkabelung:

- Zuverlässige Isolation gegen korrosives Seewasser, insbesondere an Verbindungsstellen
- In Bereichen niedriger Dehnung verlegen (mit FEM ermitteln),
- Spezielle Litze verwenden, die hohe Dehnungen verträgt.

Drehverbindung:

- Kabel werden im Bereich des Interface mit flexiblem Stahlschlauch gebündelt,
- gleichmäßige Verdrehung über die Länge der Bohrung.

Restlebensdauer:

- Bewertung anhand der Summe der bisherigen Beanspruchung verschiedener Lastniveaus im Vergleich mit experimentell bestimmter Wöhlerkurve des verwendeten GFK-Laminats,
- Vorstufe: außergewöhnliche Dehnungsspitzen zur Identifikation einer (fortschreitenden) Schädigung,
- Vergleich mit zu erwartenden Dehnungen laut Simulation.

Die Beurteilung der Schädigung der Flosse erfolgt aus dem Rückschluss von DMS-Messwerten auf die Verformung bzw. den Winkel des flexiblen Elements der Flosse. Es werden dazu Messpunkte (DMS) entlang einer Linie in der Mitte der flexiblen Flosse verwendet. Es erfolgt eine Aufbereitung der Messwerte (Methode der kleinsten Quadrate) um Ausreißer identifizieren zu können.

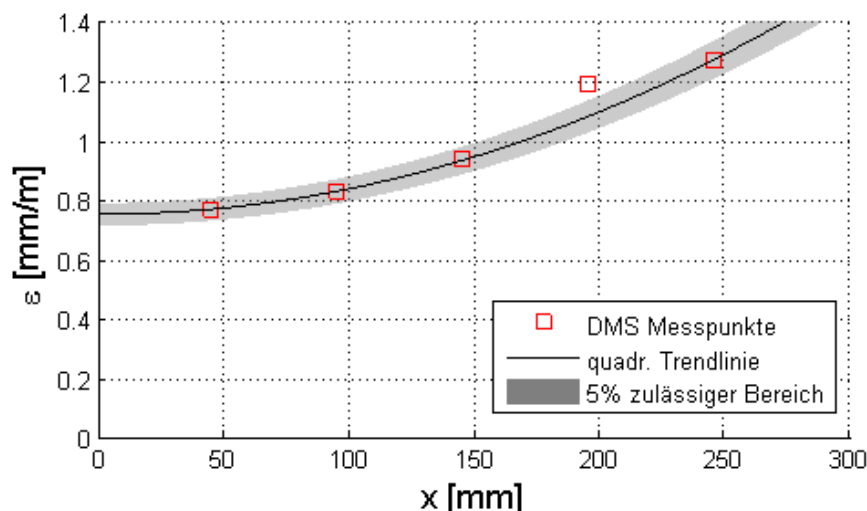


Abbildung 2.55: Bsp. aus dem FEM-Modell des NEWA 4 Prüflings bei einem Winkel von 20°.

Für diese Vorgehensweise können zwei Ansätze zur Beschreibung der Dehnungsverteilung verwendet werden:

- Balkendifferentialgleichung
(Einfluss äußerer Flächenlast kann mit einbezogen werden)
- quadratische Funktion (Ansatz höherer Ordnung)

durch Integration entstehen dann die Gleichungen für:

- Winkelverteilung
- Verschiebungsverteilung.

Die Bestimmung der Konstanten der erhaltenen Gleichungen erfolgt über Messergebnisse und Randbedingungen.

Ein Methodenvergleich der Balken-DGL (19,7°) und der quadratischen Funktion (20,7°) zeigt für den quadratischen Ansatz eine bessere Übereinstimmung mit FEM-Ergebnissen (Abbildung 2.56), während die Balken-DGL näher an der Winkelvorgabe von 20° ist. Eine finale Methodenauswahl soll durch statische Tests an der fertigen Flosse erfolgen.

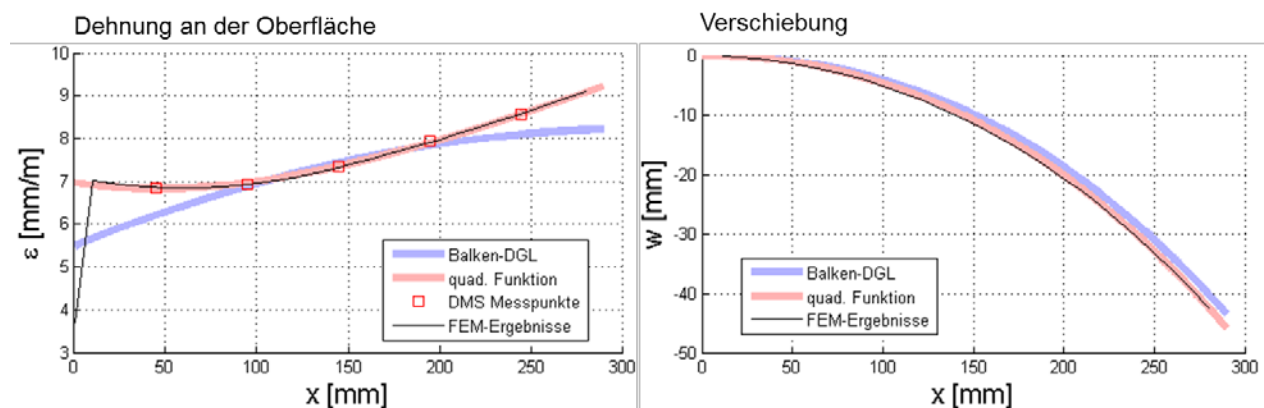


Abbildung 2.56: Vergleich der Balken-DGL und des quadratischen Ansatzes für die Dehnungsverteilung.

Das Messsystem wurde gegenüber dem ursprünglichen Konzept nicht für den Dauereinsatz ausgelegt, sondern nur für den Erprobungszeitraum von sechs Monaten modifiziert. Dazu gehörten die Verwendung von Dehnmessstreifen (DMS) und der Verzicht auf eine Berechnung der Restlebensdauer. Stattdessen sollen anhand der Dehnungsmessungen die Ausschläge der flexiblen Hinterkante berechnet und mit den Steuergrößen abgeglichen werden.

2.1.4.2 Entwurf des Sensornetzes

Die Verwendung von DMS machte eine genaue Planung ihrer Platzierung nötig, da diese bei zu hohen Dehnungen sehr schnell degradieren. Spezielle DMS, die solche Belastungen länger vertragen, sind entsprechend kostenintensiv. Laut den Ergebnissen aus Finite-Element-Simulationen sind bei einem Winkel der Hinterkante von 20°, welcher der maximal zu erwartende Ausschlag sein sollte, Dehnung von 7000 bis 9000 $\mu\text{m/m}$ auf der Oberfläche der GFK-Mittelebene zu erwarten (Abbildung 2.57). Standard-DMS überstehen laut Herstellerangaben [18] bei diesen Dehnungsniveaus keine zehn Lastzyklen. Über den Versuchszeitraum von sechs Monaten hätte mit einer durchschnittlichen Periodendauer von

7s mit etwa 2 Millionen Lastzyklen gerechnet werden müssen. Erst bei Dehnungspegeln im Bereich von 1500 $\mu\text{m}/\text{m}$ erreichen nahezu alle DMS-Varianten Lastwechselzahlen von 10^6 und höher.

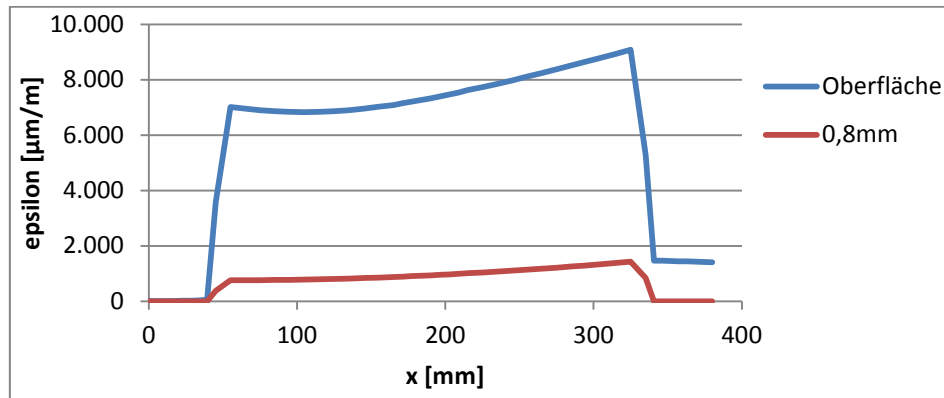


Abbildung 2.57: Dehnung auf der Oberfläche und bei einem Abstand von 0,8mm von der neutralen Faser der flexiblen GFK-Mittelebene bei einem Winkel der Hinterkante von 20°, berechnet mit FE-Modell.

Der Einsatz von geschichteten Kompositen, wie etwa GFK, ermöglicht auch eine Integration der DMS. Bei einem Abstand von einer Lage (0,8mm) von der neutralen Faser liegen die Dehnungen bei akzeptablen 800 bis 1400 $\mu\text{m}/\text{m}$. Passende Modelle konnten bei der Firma HBM gefunden werden. Die Serie LI66 verfügt über lange Pins, die durch folgende Lagen gestochen werden (Abbildung 2.58). Die Pins ragen aus dem fertigen Laminat heraus und ermöglichen die Kontaktierung. Theoretische und praktische Hinweise zur Integration von DMS wurden einer Dokumentation von HBM entnommen [19].



Abbildung 2.58: DMS zur Integration in Faserverbundwerkstoffe, LI66-10/350, Fa. HBM GmbH.

Die Position der DMS im flexiblen Flossenteil hängt maßgeblich von der Messaufgabe ab. Eine Hauptinformation, die mit Hilfe der DMS gewonnen werden soll, ist die Auslenkung der Hinterkante. Hierzu befinden sich fünf Messstellen in einer Reihe mit ungefähr gleichen Abständen etwa mittig im flexiblen Flossenteil (Abbildung 2.59). Rein theoretisch hätten auch bereits 2 Messstellen ausgereicht, um mithilfe der Biegelinie die Auslenkung zu berechnen. Die verwendete größere Anzahl sollte zum einen zu einer genaueren Berechnung beitragen, zum anderen beim Ausfall einzelner DMS noch genügend Informationen bereitstellen. Zusätzlich soll auch die Verformung an den beiden Rändern der Flosse gemessen werden, um eine mögliche Torsion der Flosse aufgrund ungleichmäßiger Belastungen erfassen zu können. Hier sind pro Seite nur drei Messstellen vorgesehen. Die Informationen waren an

dieser Stelle nicht von so großer Bedeutung, wie vergleichsweise die Informationen bezüglich der mittleren Biegelinie. In der Mittelebene befinden sich Bohrungen, die beim Vergießen der Flosse mit PU eine Verbindung zwischen den beiden Seiten herstellen soll. In der Nähe dieser Bohrungen entstehen bei Biegung der Mittelebene lokale Spannungsüberhöhungen, die nicht Teil der Messaufgaben sind. Daher wurden die DMS-Positionen in möglichst großem Abstand zu den Bohrungen geplant. Einige der Bohrungen sind genau in der Mitte der Flosse, wodurch die mittleren DMS-Reihen leicht zur Seite versetzt werden mussten.

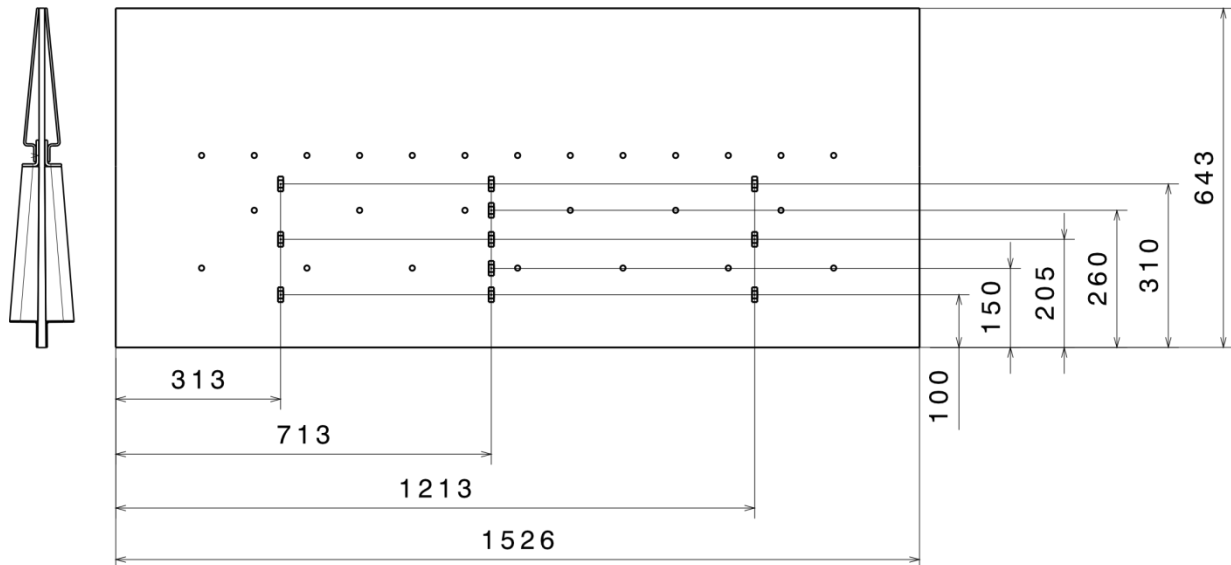


Abbildung 2.59: Position der DMS in der GFK-Mittelebene, Kreise markieren Bohrungen zur Verbindung der PU-Außenhaut auf beiden Seiten des flexiblen Flossenteils.

Pro Messstelle sind jeweils zwei DMS vorgesehen, welche in gleichem Abstand ober- und unterhalb der neutralen Faser platziert werden (Abbildung 2.60). Dadurch können, im Gegensatz zu einem einzelnen DMS, reine Längsdehnungen herausgerechnet werden. Für die Biegelinie werden nur Biegedehnungen benötigt. Werden Längsdehnungen gemessen, können diese sowohl durch Temperaturdehnungen entstehen, als auch durch die Folge von Nullpunktdrift bei Degradation der DMS sein. Idealerweise würden die Informationen für jeden DMS separat aufgezeichnet werden. Es sind jedoch wesentlich weniger Messkanäle und damit auch weniger Messverstärker nötig, wenn die DMS-Paare als Wheatstone'sche Messbrücke verschaltet werden. Bei der verwendeten Halbbrücke löschen sich Längsdehnungen automatisch gegenseitig aus. Durch die Verwendung von Messbrücken verringert sich auch die Anzahl der Leitungen, die durch die Flossen geführt werden müssen.

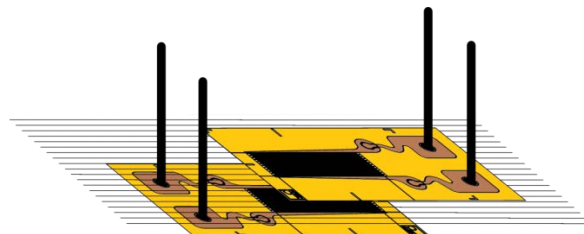


Abbildung 2.60: DMS einer Messstelle im GFK-Laminat, Messgitter liegen genau übereinander im gleichen Abstand von der neutralen Faser (gestrichelte Ebene).

Bei der Fertigung zeigen die Pins beider DMS in die gleiche Richtung. Die DMS sind dabei so gedreht und versetzt zueinander, dass die Messgitter genau übereinander liegen. Die herausstehenden Pins sollten auf etwa 2mm gekürzt werden, da diese Länge zum Kontaktieren ausreicht. Anschließend sollten sie mit einem festen Schaumstoff geschützt werden, um ein Durchstechen der Vakuumfolie und ein Verkleben der Pins bei der Harzinjektion zu verhindern (Abbildung 2.61).

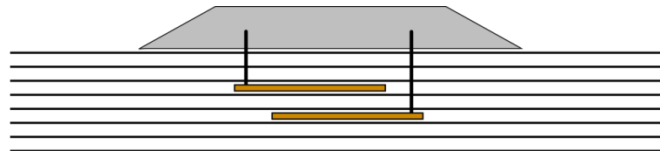


Abbildung 2.61: Schematische Seitenansicht der DMS an einer Messstelle. Die Enden der Pins, die aus dem GFK herausstehen, werden während der Injektion und Aushärtung mit einem festen Schaum (graue Fläche) geschützt.

Neben den DMS im flexiblen Flossenteil wurde vonseiten BaltiCo angeregt, einige Verstreben in einer Hauptflosse mit DMS zu überwachen. Aufgrund der finalen Auswahl der Messverstärker sind steuerbord noch fünf Messkanäle frei, die für fünf einzelne DMS in der Hauptflosse verwendet werden. Jede Messstelle im flexiblen Flossenteil mit Halbbrückenschaltung benötigt drei Leitungen. Da 12-adrige Kabel verwendet werden, müssen backbord drei Kabel von der Flosse zu den Messverstärkern geführt werden, während steuerbord durch die zusätzlichen DMS in der Hauptflosse 4 Kabel nötig sind. Wie bereits vorher festgelegt wurde, wird auf zusätzliche Schleifringe zwischen Flosse und Schiff verzichtet, da der maximale Verdrehwinkel von $\pm 60^\circ$ durch ein etwa 1m freies Kabel problemlos ausgeglichen werden kann. Dadurch können keine zusätzlichen Störungen der Sensorsignale durch ein zwischengeschaltetes Bauteil entstehen.

2.1.4.3 Entwurf des Messsystems

Zur Auswahl der passenden Hardware zur Aufzeichnung der Sensormesswerte wurden zuerst Anforderungen gesammelt. Neben den Dehnungssignalen der DMS mussten auch verschiedene Steuerparameter des Schiffes aufgezeichnet werden, um eine eindeutige Korrelation zwischen den äußeren Lasten, der Flossensteuerung und der Verformung des flexiblen Flossenteils herstellen zu können. Dazu gehört:

- Ansteuerung von fünf DMS in Viertelbrückenschaltung
 - 5 Messstellen an Verstreben in der Hauptflosse
- Ansteuerung von 22 DMS-Messstellen in Halbbrückenschaltung
 - Je Seite 11 Messstellen:
 - 3 Messstellen für Torsion schiffsfern
 - 5 Messstellen für Biegung mittig
 - 3 Messstellen für Torsion schiffsnah
 - Jede Messstelle bestehend aus 2 DMS in Viertelbrückenschaltung
- Aufzeichnung der 7 Spannungssignale der Schiffssteuerung (SPS-Daten)
 - Schiffsgeschwindigkeit

- Rollwinkel
- Rollrate
- Flossenwinkel steuerbord
- Flossenwinkel backbord
- Proportionalventilspannung steuerbord
- Proportionalventilspannung backbord
- Aufzeichnung der 6 Stromsignale von Drucksensoren der Flossensteuerung
 - Pro Seite 3 Drücke der Flossenhydraulik
- Aufzeichnung aller Messwerte über 6 Monate
 - Abtastfrequenz von 10Hz (Rollperiode laut Pflichtenheft von 7s → Ansteuerung der Flosse mit unter 0,2Hz)

Für die Ansteuerung von DMS in Viertelbrückenschaltung finden sich nur wenige Systeme auf dem Markt, vor allem in Kombination mit den anderen Messgrößen, der großen Anzahl von 40 benötigten Kanälen und der Anforderung an einen einfach zu bedienenden Datalogger. Letztlich konnte die QuantumX-Baureihe von HBM den Anforderungen entsprechen. Die Planung von Typ und Position der Messschränke erfolgte in Absprache mit dem Partner BVI und der Bundespolizei. Damit die Sensorsignale möglichst unverfälscht von Störungen infolge langer Kabel aufgenommen werden konnten, ergab sich die Notwendigkeit die Flossenaufhängungen in unmittelbarer Nähe der Messschränke zu installieren. Eine Verbindung der Messverstärker mit dem Datalogger ist per Ethernet-Kabel möglich, wodurch auch größere Kabellängen kein Problem darstellen. Folglich genügt ein Gerät für die Steuerung und Aufzeichnung sowohl der Steuer- als auch der Backbordsignale.

Ursprünglich geplante Bestückung der Messschränke:

- Backbord:
 - Datalogger HBM QuantumX CX22
 - Messverstärker HBM QuantumX MX1615
 - 11 Kanäle für DMS-Halbbrücken
 - 3 Kanäle für Drücke der Flossenhydraulik
 - Ethernet Switch 5-Port
- Steuerbord:
 - Messverstärker HBM QuantumX MX1615
 - 11 Kanäle für DMS-Halbbrücken
 - 5 Kanäle für DMS-Viertelbrücken
 - Messverstärker HBM QuantumX MX1601
 - 7 Kanäle für Signale der Schiffssteuerung
 - 3 Kanäle für Drücke der Flossenhydraulik

2.1.4.4 Integration, Applikation und Verkabelung der DMS

Die Fertigung der Flossen erfolgte bei BaltiCo in Hohen Luckow. Vonseiten des DLR wurden 50 DMS vom Typ HBM LI66-10/350 zur Verfügung gestellt. Dazu kommen generelle Informationen zur Integration von DMS in Faserverbundstrukturen sowie zur Platzierung der DMS in der GFK-Mittelebene. Das schließt sowohl die Position in der Ebene (Abbildung 2.59) als auch die Tiefeninformation im Gelege ein (Abbildung 2.62). Die herausstehenden Pins der ersten Ebene wurden nicht korrekt vorbereitet, wodurch Harz an diesen hochgezogen ist und sie mit dem Schaumstoff verklebt hat. Infolgedessen ist beim

Entformen eine Anzahl an Pins abgebrochen (Abbildung 2.63). Beim Verkabeln der DMS durch das DLR konnten diese glücklicherweise dennoch alle kontaktiert werden, da die Pins genau an der Oberfläche der Mittelebene gebrochen sind. Die Kontaktflächen sind entsprechend klein und sehr empfindlich gegenüber mechanischer Belastung. Bei der Fertigung der zweiten Mittelebene gab es Lufteinschlüsse, wodurch das Bauteil nicht verwendet werden konnte. Infolgedessen waren die integrierten DMS verloren und mussten von BaltiCo erneut bestellt werden. Die dritte Mittelebene wurde ohne diese Probleme fertiggestellt und auch die Pins wurden unbeschädigt freigelegt. Das Verkabeln und Überprüfen der DMS durch das DLR erfolgte noch bei BaltiCo, bevor die Kontaktstellen durch weitere folgende Arbeitsschritte unzugänglich wurden. Im Zuge dessen wurden auch die 5 DMS in der steuerbord Hauptflosse appliziert und verkabelt. Die applizierten DMS sowie die verlöteten Kontakte der integrierten DMS wurden in einem letzten Schritt mit Acrylmasse versiegelt (Abbildung 2.64). Zum einen soll das die empfindlichen Kontakte vor folgenden Arbeitsschritten zum ändern auch vor eventuell eintretendem Salzwasser schützen. Zur eindeutigen und nachvollziehbaren Zuordnung der Leitungen zu den einzelnen DMS wurden Kabelpläne angefertigt (Abbildung 2.65 und Abbildung 2.66). Die Montage des flexiblen Flossensegments an die Hauptflosse erfolgte erst bei BVI, nach dem beide Teile bereits fertig waren. Dadurch war es nicht möglich, die Kabel direkt von den Messstellen im flexiblen Flossenteil durch die Hauptflosse zu ziehen. Stattdessen mussten die einzelnen Kabelsegmente an der Verbindungsstelle mit entsprechenden Steckern verbunden werden.

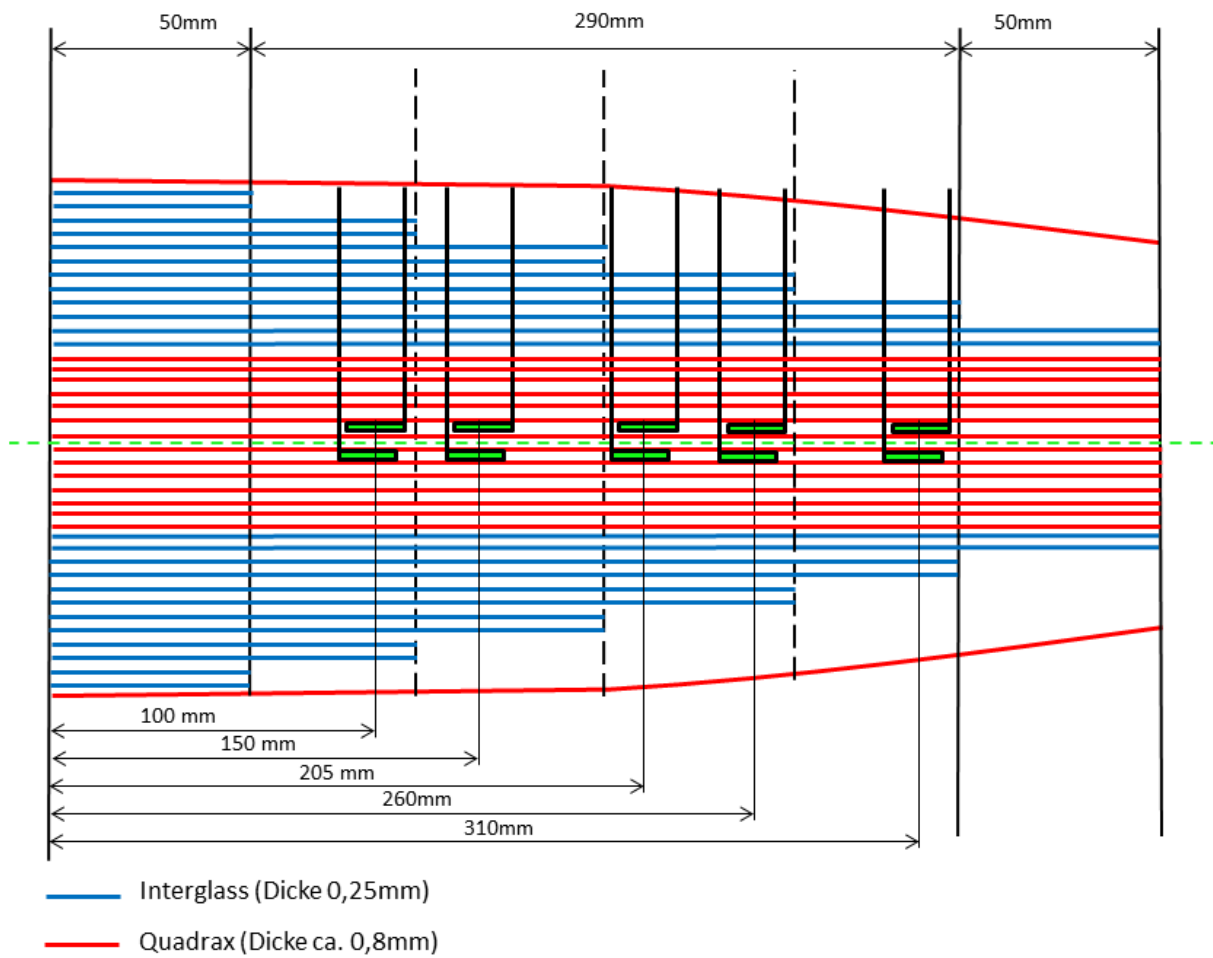


Abbildung 2.62: Lagenposition der DMS in der GFK-Mittelebene.

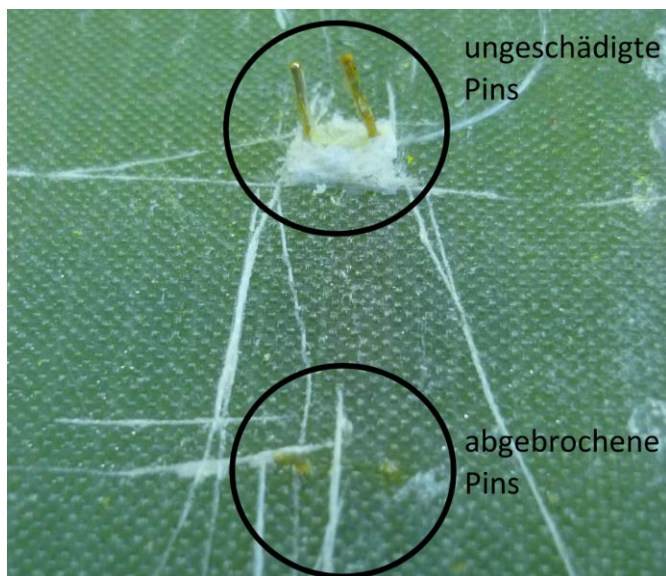


Abbildung 2.63: Herausragende Pins der ersten GFK-



Abbildung 2.64: GFK-Mittelebene mit

Mittelebene, ein Pin-Paar ist beim Entformen abgebrochen.

versiegelt und verkabelten DMS-Messstellen.

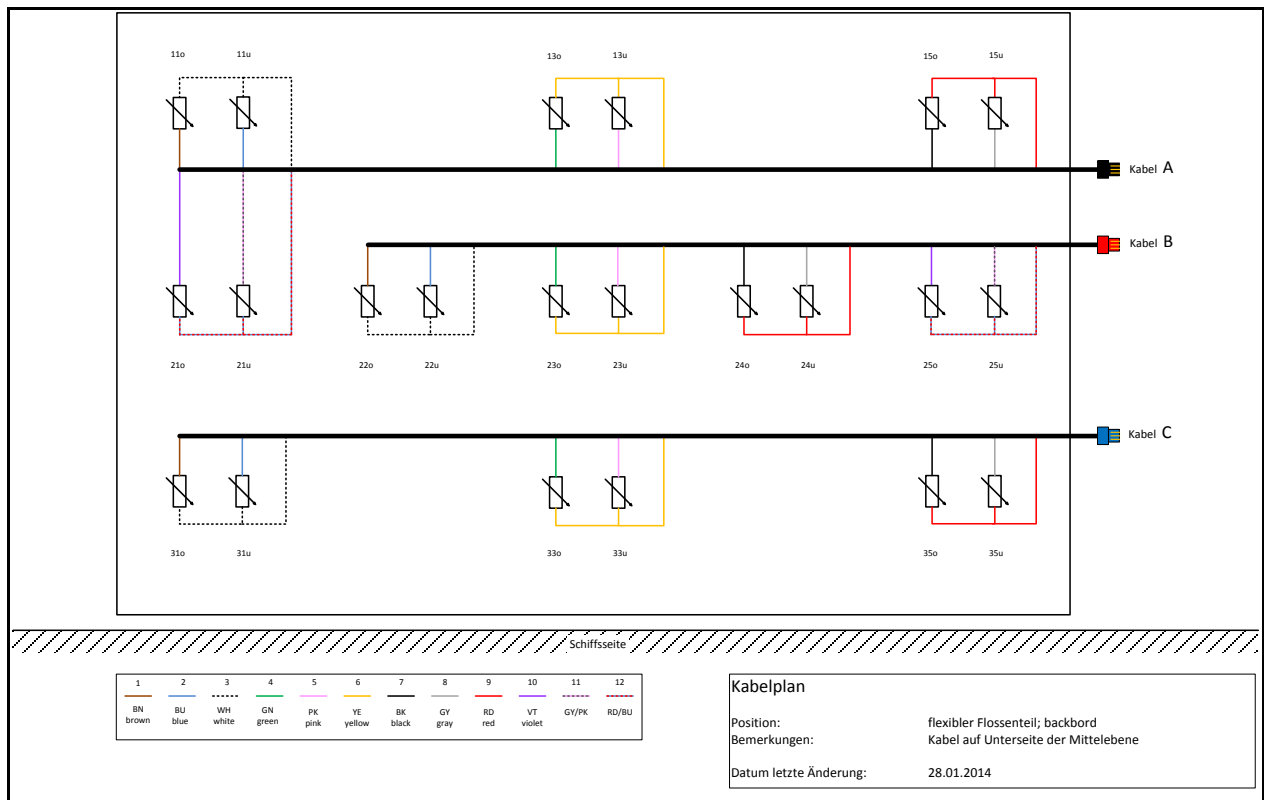


Abbildung 2.65: Kabelplan für den flexiblen Flossenteil backbord.

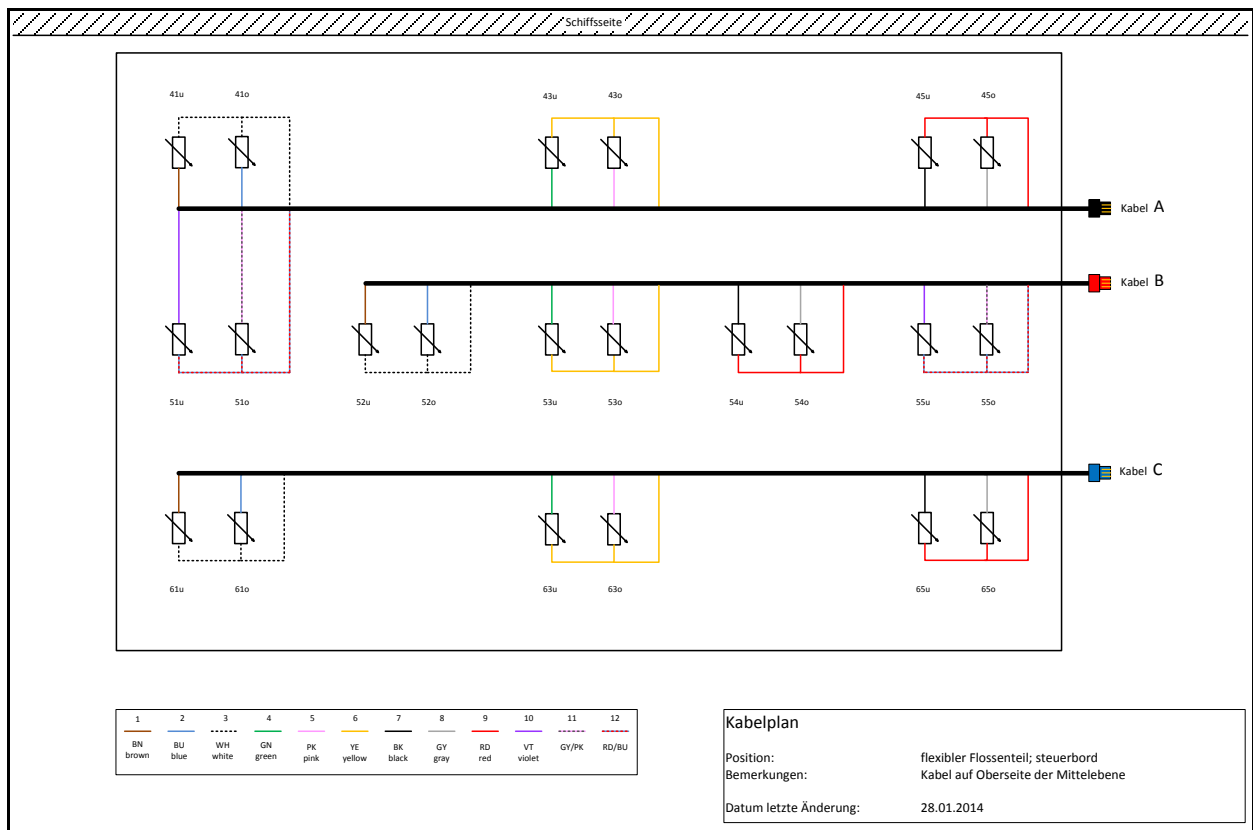


Abbildung 2.66: Kabelplan für den flexiblen Flossenteil steuerbord.

2.1.4.5 Einbau der Messverstärker

Der Einbau der Stabilisierungsflossen, der Hydraulikaggregate und der Messschränke sowie die Verrohrung und Verkabelung wurde von BVI durchgeführt. Die falsche äußere Beschriftung der Messschränke führte dazu, dass diese jeweils auf der falschen Seite verbaut wurden. Dies und weitere Schwierigkeiten führten zu Verzögerungen, sodass die Messschränke nicht termingerecht zum Einbau der Messhardware bereits standen. Dazu gehörten zum einen Signalleitungen, die nicht angelegt waren und zum anderen fehlende Halterungen für die Messhardware. Des Weiteren muss in irgendeinem Produktionsschritt die Zuordnung der Flossen zu Steuer- und Backbord vertauscht worden sein. Dies ist für die Funktion der Flossen unerheblich, da beide Seiten prinzipiell gleich aufgebaut sind, allerdings befindet sich dadurch das zusätzliche vierte Kabel für die 5 Sensoren in der Hauptflosse nun auf backbord statt steuerbord. Obwohl sowohl Messschränke als auch Flossen vertauscht sind, ist ein einfacher Tausch der Messhardware nicht möglich, da SPS-Daten weiterhin steuerbord ankommen. Infolgedessen war es nötig die Kanalbelegung zu verändern und zusätzliche Leitungen zwischen beiden Stabilisatorräumen zu verlegen, um die backbord Drucksignale mit dem MX1601 Messverstärker steuerbord aufzunehmen. Aktualisierte Kabelpläne, die die veränderte Situation widerspiegeln, sind in Abbildung 2.67, Abbildung 2.68 und Abbildung 2.69 zu finden.

Finale Bestückung der Messschränke:

- Backbord:
 - Datalogger HBM QuantumX CX22
 - Messverstärker HBM QuantumX MX1615
 - 11 Kanäle für DMS-Halbbrücken
 - 5 Kanäle für DMS-Viertelbrücken
 - Ethernet Switch 5-Port
- Steuerbord:
 - Messverstärker HBM QuantumX MX1615
 - 11 Kanäle für DMS-Halbbrücken
 - Messverstärker HBM QuantumX MX1601
 - 7 Kanäle für Signale der Schiffssteuerung
 - 6 Kanäle für Drücke der Flossenhydraulik

Das Durchmessen der DMS-Widerstände vor dem Anschluss an die Messverstärker ergab, dass alle Sensoren die erwarteten 350 Ohm anzeigten und damit die funktionstüchtig waren. Die Messschränke mit installierter Messhardware sind in Abbildung 2.71 und Abbildung 2.72 dargestellt.

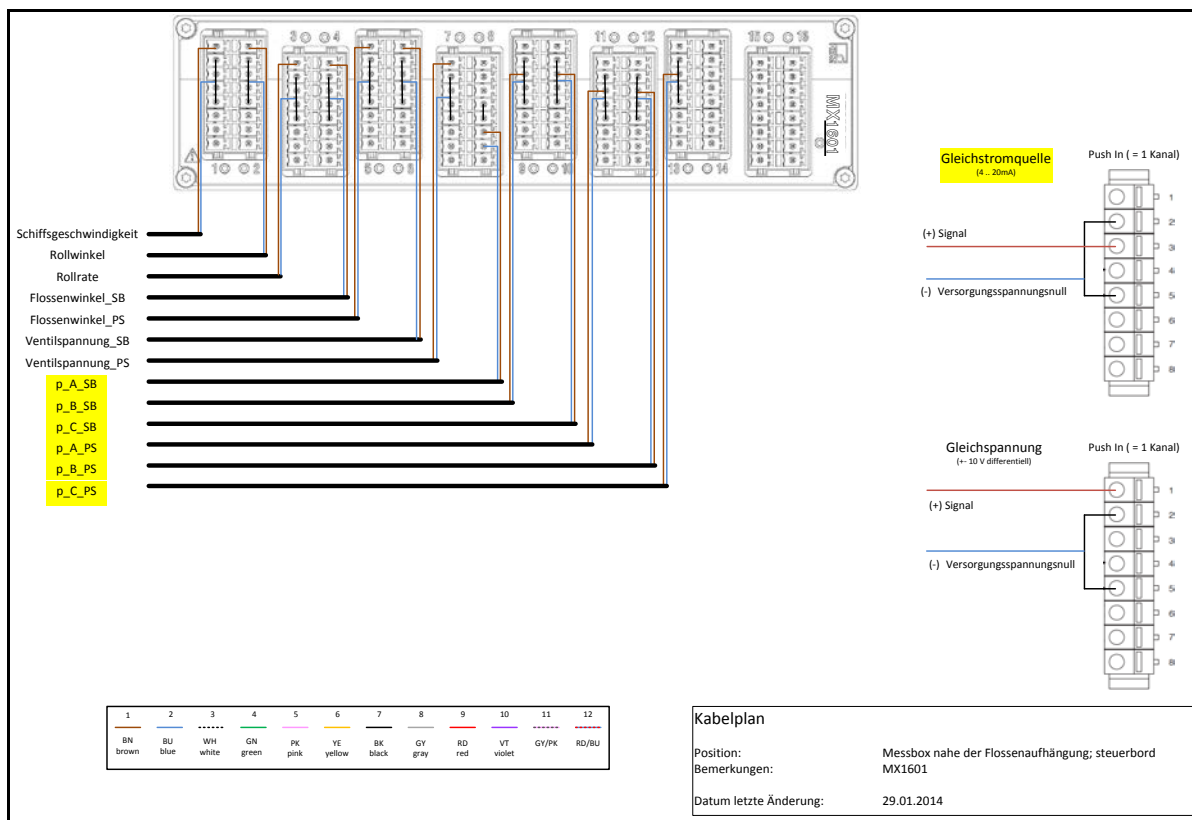


Abbildung 2.67: Kabelplan für den Messverstärker MX1601 auf steuerbord.

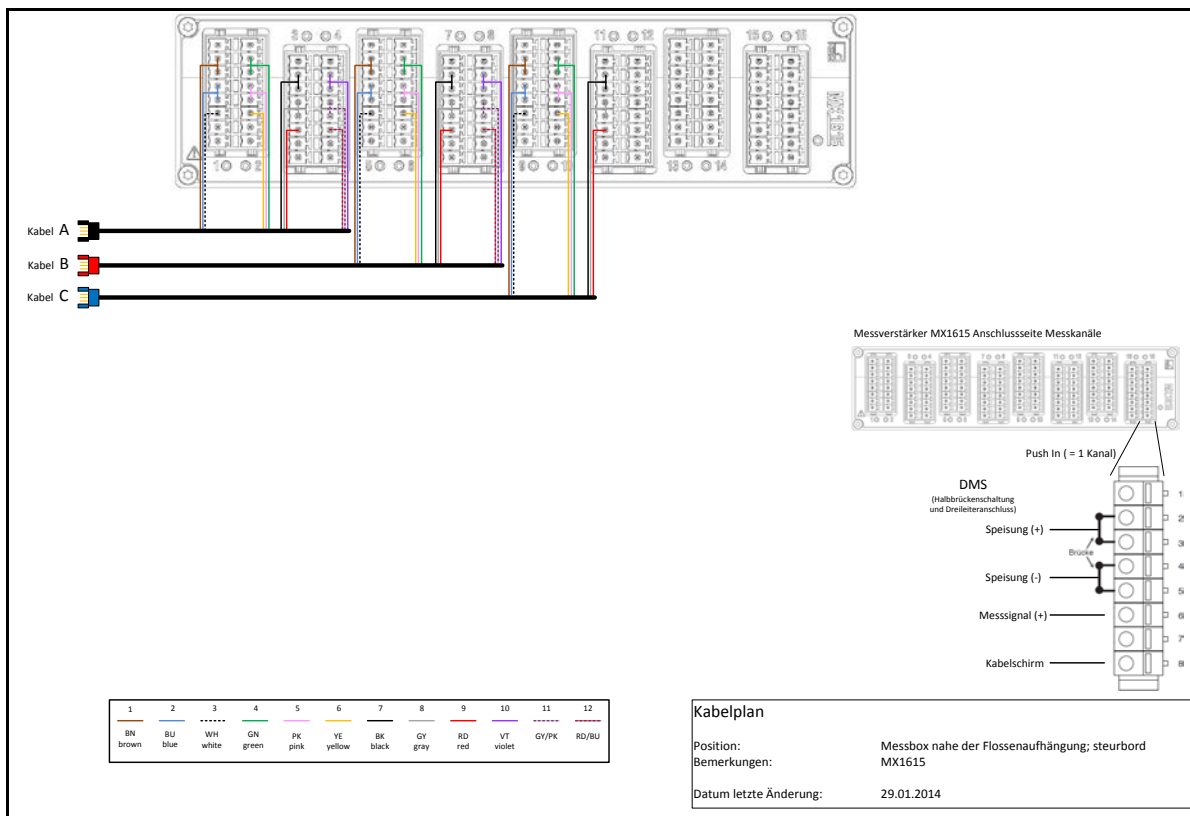


Abbildung 2.68: Kabelplan für den Messverstärker MX1615 auf steuerbord.

Direkt im Anschluss an die Probefahrt der Eschwege am 12.12.2013, bei der die Funktionstüchtigkeit der Flossen getestet wurde, musste festgestellt werden, dass an sechs Messstellen keine Signale mehr messbar waren. An fünf dieser Messstellen war nur je eine der Leitungen ohne Kontakt. Hier konnte jeweils mit den verbleibenden zwei Leitungen ein DMS mit Viertelbrückenschaltung weiter verwendet werden. Welche Auswirkungen dies auf die Auswertung hat, dürfte sich erst später zeigen. Die sechste Messstelle ist allerdings nicht weiter verwendbar. Wegen dieser Ausfälle nach kurzer Betriebszeit wurde zunächst ein Verlust weiterer Sensoren befürchtet. Nach etwas über einem Monat Betrieb, ist jedoch nur ein weiterer Sensor im flexiblen Flossenteil ausgefallen (Abbildung 2.70). Von den fünf Sensoren in der Hauptflosse sind aus unbekannten Gründen zwei ausgefallen. Die verbleibenden Sensoren in der flexiblen Flosse sollten ausreichen, um alle sechs Biegelinien mit ausreichender Genauigkeit berechnen zu können.

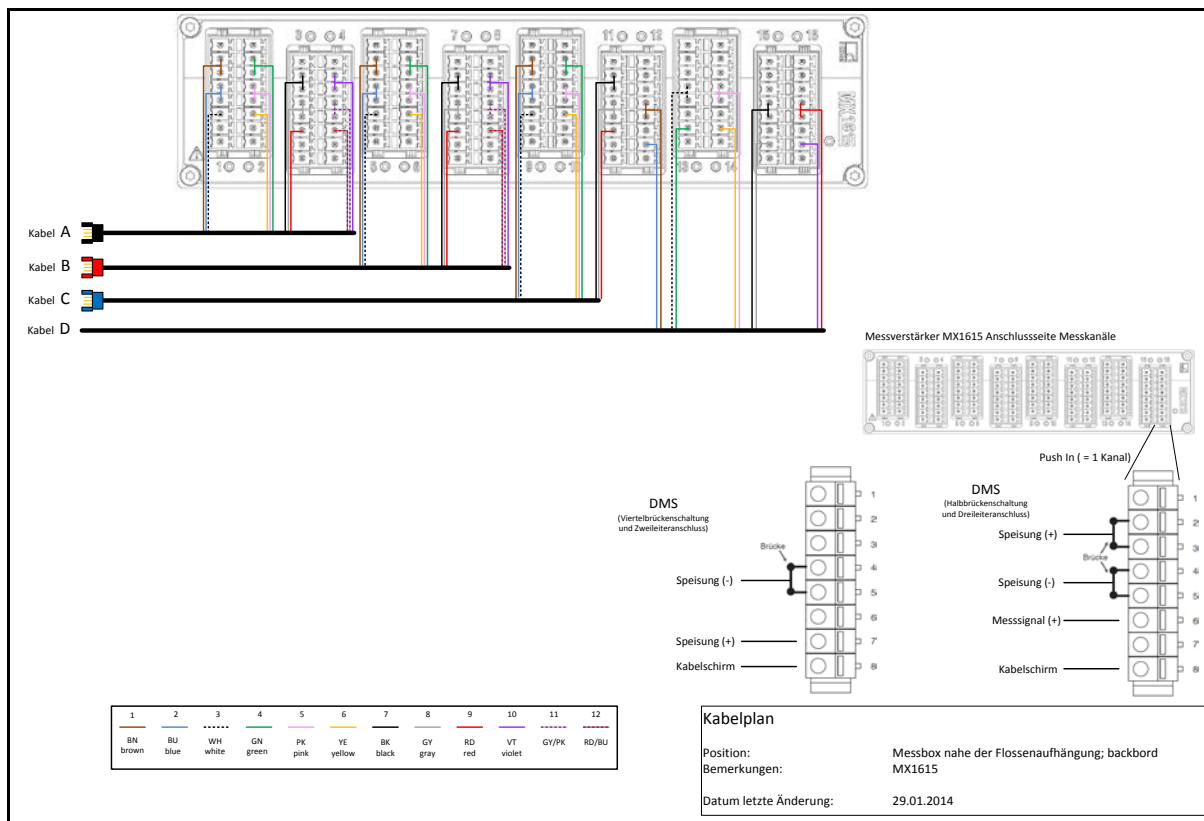


Abbildung 2.69: Kabelplan für den Messverstärker MX1615 auf backbord.

Bei der Installation der Messhardware ist weiterhin die Möglichkeit von kurzen Spannungsunterbrechungen im Schiffsbetrieb klar geworden. Dieser Aspekt wurde bei der Auslegung des Systems nicht berücksichtigt, da er weder vonseiten der Projektpartner erwähnt wurde noch im Pflichtenheft aufgelistet war. Wegen dieses Problems konnte das System während des Monats nach der Probefahrt am 12.12.2013 keine Messdaten aufzeichnen. Spannungsausfälle von unter fünf Minuten treten im Fall der BP Eschwege auf, wenn das unterbrechungsfreie Umschalten zwischen der Bordversorgung und dem Landstrom oder zwischen Hilfsaggregat und Hauptmaschine fehlschlägt. Wird die Stromversorgung nach einem solchen Spannungsabfall wieder hergestellt, startet das Messsystem wieder, jedoch wird die Messung nicht automatisch fortgesetzt. Softwareseitig konnte nicht direkt eine Lösung gefunden werden. Als alternative Lösung wurde der Einbau einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) erörtert, welche in der kleinsten Variante ca. 30 Minuten überbrücken kann. Allerdings konnte mit überschaubarem Aufwand letztlich die Software des Dataloggers so eingestellt werden, dass die Messung automatisch gestartet wird. Im Gegensatz zum automatischen Fortsetzen der Messung gehen bei dieser Konfiguration die Daten zwischen der letzten Speicherung und dem Stromausfall verloren. Um größere Lücken in den geplanten sechs Monaten der Datenaufzeichnung zu vermeiden, werden die Messdaten alle sechs Stunden in eine separate Datei gespeichert. Dies stellt einen Kompromiss zwischen einem möglichst durchgehenden Datensatz und einer kleinen Anzahl an Ergebnisdateien dar. Beim gewählten Speicherintervall entstehen beispielsweise bereits etwa 730 Dateien im Erprobungszeitraum. Eine kontinuierliche Messung erfolgt damit seit dem 20.01.2014.

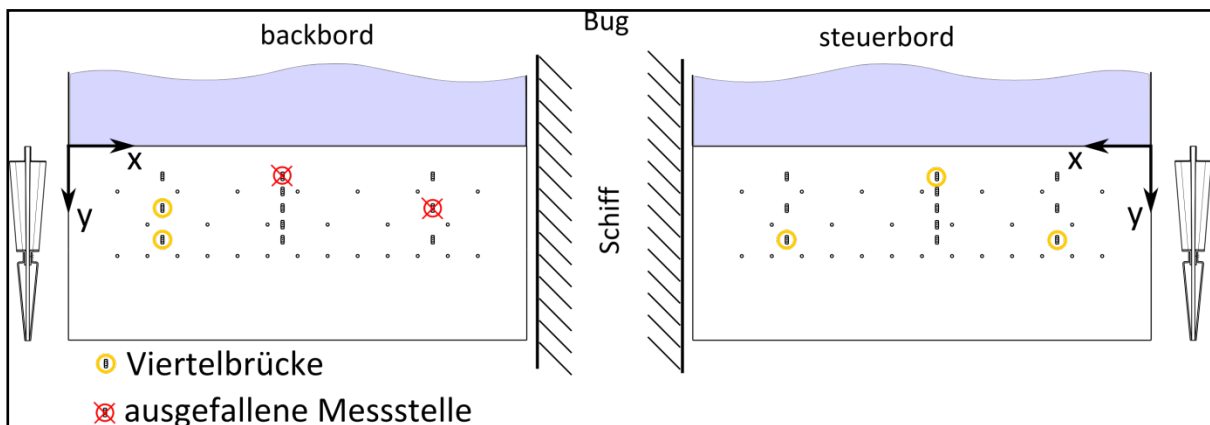


Abbildung 2.70: fehlerhafte Sensoren in den flexiblen Flossensegmenten (Stand 20.01.2014).



Abbildung 2.71: Messschrank backbord.



Abbildung 2.72: Messschrank steuerbord.

2.1.4.6 Auswertung der Messdaten

Das Messsystem speichert die Daten in einem eigenen Format und mit einfacher Genauigkeit (4 Byte), um möglichst wenig Speicherplatz zu verwenden. Da die Verarbeitung der Sensordaten im numerischen Berechnungsprogramm Matlab der Firma MathWorks erfolgt und um Rundungsfehler zu vermeiden, werden die Daten zuerst mit der Software catmanAP von HBM in einen Matlab-Variablencontainer (.mat) mit einer Genauigkeit von 8 Byte umgewandelt. Vor der eigentlichen Auswertung werden die Daten noch aufbereitet. Dazu gehört die Auswahl des zu verarbeitenden Zeitbereichs, da die folgenden Berechnungsschritte für eine große Zahl an Daten sehr zeitintensiv sein können. Der

Gleichanteil der Signale wird über die Subtraktion des Median entfernt. Der Vorteil des Medians gegenüber beispielsweise dem Mittelwert ist dessen Robustheit gegenüber Ausreißern. Erst nach diesem Schritt können Ausreißer zuverlässig entfernt werden. Dazu wird der Mittelwert der absoluten Daten gebildet und alle Zeitpunkte die über dem fünffachen dessen liegen auf null gesetzt. Drei Iterationen sorgen dafür, dass auch Ausreißer entfernt werden, die so große Werte besitzen, dass sie die Mittelwerte merklich beeinflussen (Abbildung 2.73 und Abbildung 2.74). Eine anschließende Filterung der Daten sorgt für deutlich geglättete Zeitverläufe. Dazu wird ein Tschebyscheff-Filter zwölfter Ordnung verwendet. Da die Rollperiode bei etwa 7s liegt, ist mit einer mittleren Anregungsfrequenz von etwa 0,14Hz zu rechnen. Aufgrund dessen haben sich eine obere und untere Grenzfrequenz von 1Hz bzw. 0,001Hz als wirksam herausgestellt. Nach der Aufbereitung der Daten wird aus den gemessenen Dehnungen der Winkel der Flossenhinterkante für jede Sensorreihe berechnet. Dazu wird die Krümmungsverteilung mit einer quadratischen Trendlinie angenähert. Im Fall von nur zwei Messstellen einer Sensorreihe wird alternativ eine lineare Näherung verwendet. Anschließend wird diese integriert, wodurch man die Winkelverteilung erhält. Die Konstante wird null, wenn die feste Einspannung an der Hauptflosse als Randbedingung hinzugenommen wird. Evaluiert man die Gleichung am Ende des flexiblen Elements, erhält man den Winkel der Hinterkante.

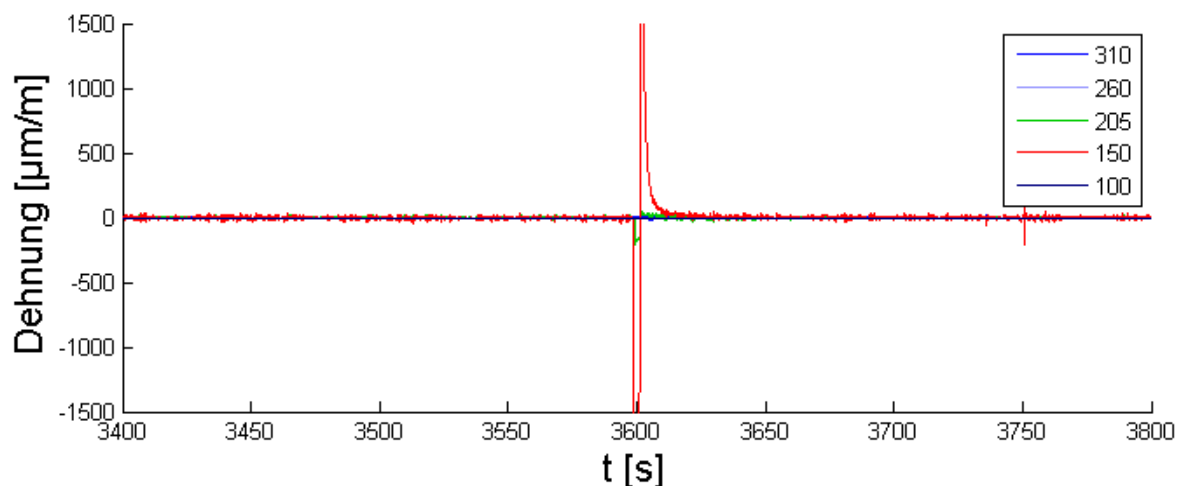


Abbildung 2.73: Zeitsignal mit einem Ausreißer.

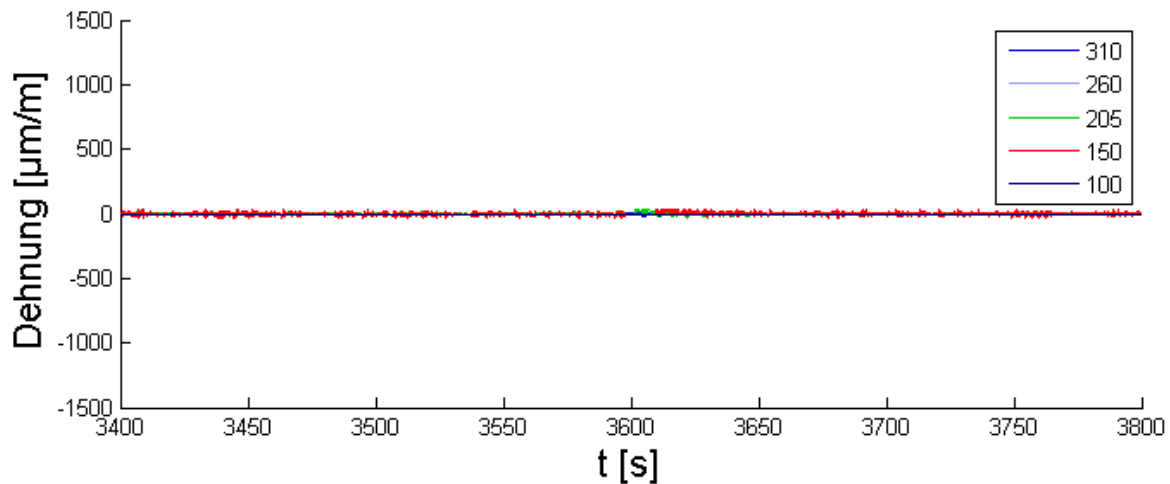


Abbildung 2.74: Zeitsignal nach dem Entfernen der Ausreißer.

In Abbildung 2.75 sind die Messwerte der mittleren Sensorreihe während einer Fahrt am 15.01.2014 nach den genannten Bearbeitungsschritten zu sehen. In Abbildung 2.76 ist der daraus berechnete Winkel der Hinterkante abgebildet. Vergleicht man dies mit den Dehnungen, die mit der FEM berechnet wurden, kann man eine gute Übereinstimmung feststellen. Für einen Winkel von $0,5^\circ$ ergeben sich mit der FEM bei einem Abstand von 0,8mm von der neutralen Faser Dehnungen zwischen $20\mu\text{m/m}$ und $33\mu\text{m/m}$ über die Länge der GFK-Mittelebene.

Mögliche Verbesserungen der entwickelten Routinen sind unter anderem die Entfernung von Ausreißern mit Verteilungsfunktionen statt der Mittelwerte.

Die beschriebenen Algorithmen sind nur ein erster Schritt zu einer detaillierten Auswertung der Messdaten, zu der ein Abgleich zwischen der Flossenverformung, der Fahrt- und Steuerparameter gehört. Dies liegt im Aufgabenbereich des Partners BVI und erfordert eine gewisse Menge an Messdaten. Das genannte Verfahren wurde als kommentiertes Matlabskript an BVI übermittelt.

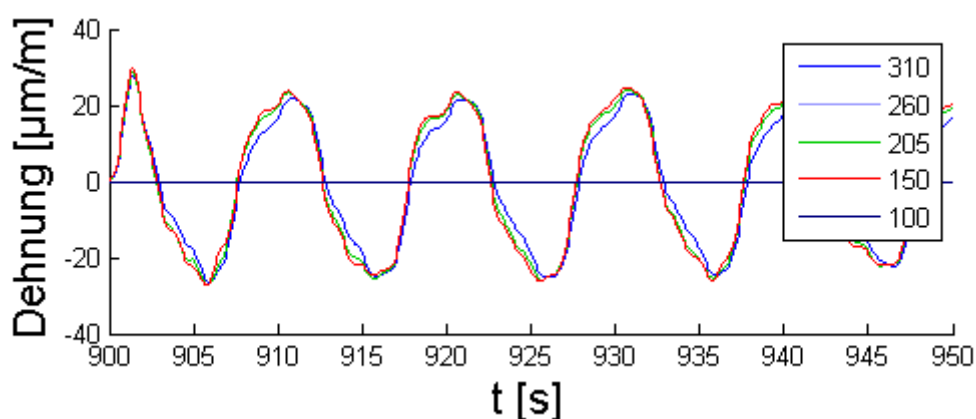


Abbildung 2.75: Dehnungen der mittleren Sensorreihe backbord.

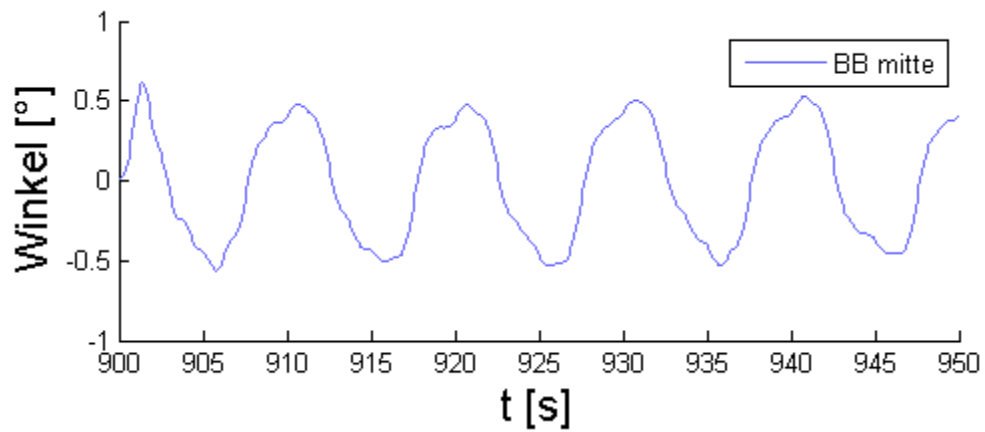


Abbildung 2.76: Winkel der Hinterkante auf Basis der Dehnungen der mittleren Sensorreihe backbord.

2.2 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde mit den Projektpartnern im Projekt NEWA eine flexible Hinterkante einer Stabilisatorflosse entwickelt, umgesetzt und an einem Schiff der Bundespolizei im Einsatz erprobt.

Für die Einführung einer Stabilisierung vor Anker durch paddeln ist eine unter-balancierte Aufhängung der Stabilisatorflossen notwendig (vgl. Abbildung 1.2). Um die wegen dieser Unter-Balancierung stark erhöhten Antriebsmomente der Flosse im In-Fahrt-Betrieb zu reduzieren, soll die Hinterkante so entworfen werden, dass sie beim Durchstellen der Flossen verformbar ist und so die hydrodynamische Last reduziert.

Die Entwicklung eines voll-aktiven Konzepts scheitert an der Komplexität des Systems unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Zeit bis zum Projektende. Zusätzlich wird das ausgewählte Konzept zur aktiven Ansteuerung mittels Druckkissen-Aktuatorik dadurch gestoppt, dass die Verträglichkeit von Bio-Öl für die Bedruckung vom Hersteller nicht garantiert werden kann. Es wird daher ein passives Konzept im Projekt weiter entwickelt, welches durch eine entsprechende Auslegung des flexiblen Teils der Flosse eine Verformung zulassen soll. Dazu werden Simulationen, Materialversuche und Versuche an Struktur-Komponenten durchgeführt. Mit Abschluss des Projekts kann eine Bauweise und Materialkombination gefunden und auf Basis der vorliegenden Daten ausgelegt werden, die die Anforderungen erfüllt. Dennoch musste wegen des hohen Termindrucks eine Vielzahl von ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen unbeantwortet bleiben.

Dies betrifft unter anderem die Materialauswahl des flexiblen Elements. Weiterführend wäre die Verwendung von Prepreg bzw. UD Glasfaser für die Herstellung der Mittelebene zu prüfen. Dies könnte zu einer deutlichen Steigerung der Bauteilqualität und damit zu einer erhöhten Lebensdauer führen. Dies wird insbesondere dann wichtig, wenn die Steifigkeit des flexiblen Elements, welches momentan am Schiff verwendet wird, geändert würde. Eine geringere Steifigkeit für eine weitere Reduktion des Antriebsmoments hätte eine größere Verformung der Hinterkante und somit höhere Dehnungen zur Folge. Eine weitere Erhöhung der Dehnungen lässt sich allerdings nur mit einem Wechsel auf unidirektionales Prepreg als Material für die Mittelebene erreichen, da sonst die zulässigen Dehnungen wahrscheinlich überschritten würden. Hinsichtlich des Schaums als Kontur gebendes Element ist die Untersuchung von Gradientenschaum vielversprechend, da es bei Verwendung eines solchen Schaums gleichzeitig als äußerste Schicht eine Trennstelle (PU-Haut zu Schaum) weniger ergibt. Diesbezüglich sind auch andersartige Schäume mit Verstärkungen zu prüfen wie z.B. Faser-Elastomere und Faser-Schäume. Durch ein Konzept zur integralen Fertigung des flexiblen Flossenteils, sodass Hauptflosse und flexibles Flosselement zusammen gefertigt werden, ließe sich die aufwändig gestaltete Trennstelle einsparen.

Generell ist die Weiterverfolgung des aktiven bzw. semi-aktiven Ansatzes sinnvoll. Erst durch ein aktives Eingreifen in das Verformungsverhalten der Flossenhinterkante kann ein optimaler Betrieb unabhängig vom Anströmungszustand ermöglicht werden. Dazu zählen die Themenkomplexe einstellbare Steifigkeit, semi-aktive Konzepte sowie voll-aktive Konzepte. Als Weiterführung des Projekts wären zunächst Druckkissentests durchzuführen und die Realisierung mit entsprechender Aktuatorik zu prüfen. Dazu wären Themen zur Anbindung der Druckkissen-Aktorik an Rippen, Fixieren der Schläuche/Druckkissen, sowie Anbindung

des flexiblen Elementes und Teilungskonzepte zu untersuchen. Schließlich stellt sich bzgl. der eingesetzten Hybridmaterialien die Frage nach der Ermüdung des Bauteils.

2.3 Verwertbarkeit

Durch die Ausnutzung von Synergieeffekten zwischen Luft- und Schifffahrtsanwendungen besteht ein signifikanter Erkenntnisgewinn als Grundlage und Ansatz weiterführender Forschungsarbeiten. Dies betrifft insbesondere den Einsatz von Elastomeren und elastischen Schäumen in Kombination mit formvariablen Faserverbundstrukturen. Der ingenieurwissenschaftliche Gehalt des Vorhabens, adaptierbare Stabilisatorflosse und OCM-System, war für die Vergabe von Masterarbeiten im Rahmen des Ingenieurstudiums bestens geeignet. Die Klärung von patentrechtlichen Fragestellungen unter den Partnern steht noch aus. Danach sind verschiedene Publikationen in einschlägigen Fachzeitschriften sowie Teilnahmen an Konferenzen geplant.

3 Literaturangaben

- [1] Campanile, L. F.: *Modal Synthesis of Flexible Mechanisms for Airfoil Shape Control*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol 19: 779-789, 2008.
- [2] Campanile, L.F., Sachau, D.: *The Belt-Rib Concept: A Structronic Approach to Variable Camber*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, March 2000, vol. 11 no. 3 215-224.
- [3] Müller, D.: *Das Hornkonzept – Realisierung eines formvariablen Tragflügelprofils zur aerodynamischen Leistungsoptimierung zukünftiger Verkehrsflugzeuge*. Dissertation, 2000, Universität Stuttgart.
- [4] A. Horoschenkoff, J. Zürner, W. Martin, G. Müller, C. Bauer, D. Müller: *Innovative Strukturkonzepte zum adaptiven Flügel*. DGLR-Jahrestagung in Leipzig, 2000
- [5] Kintscher, M., Krajenski, V., Monner, H.P.: *Numerische Untersuchung eines adaptiven Hochauftriebssystems für die Flügelvorderkante eines Verkehrsflugzeugs*. Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress DGLR 2008, 23.09.-25.09.2008, Darmstadt, Deutschland.
- [6] Kintscher, M., Wiedemann, M., Monner, H.P. und Heintze, O.: *Design of a smart leading edge device for low speed wind tunnel tests in the European project SADE*. EASN Workshop on Aerostructures, 07.10.2010 - 08.10.2010, Paris, Frankreich.
- [7] Kintscher, M., Monner, H.P., Heintze, O. *Experimental testing of a smart leading edge high lift device for commercial transportation aircrafts*. 27th International Congress of the aeronautical sciences, 19.09.2010 - 24.09.2010, Nice, France, 2010.
- [8] Kintscher, M., Wiedemann, M., Monner, H.P., Heintze, O., Kuehn, T.: *Design of a smart leading edge device for low speed wind tunnel tests in the European project SADE*. International Journal of Structural Integrity, Vol. 2, No. 4, ISSN: 1757-9864, 2011.
- [9] Kintscher, M., Monner, H.-P., Kühn, T., Wild, J., Wiedemann, M.: *Low Speed Wind Tunnel Test of a Morphing Leading Edge*. XXII Conference, Italian Association of Aeronautics and Astronautics, Napoli, 9-12 September 2013.
- [10] Heintze, Olaf et al.: *Die Vorbereitung der Faserverbundstruktur einer flexiblen und spaltfreien Flügelvorderkante auf ihren ersten großskaligen Bodenversuch*. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010, 31.08.-02.09.2010, Hamburg, Deutschland.
- [11] Wiedemann, J: *Leichtbau: Elemente und Konstruktion*. Springerverlag, 2. Neubearbeitete Auflage, ISBN-13: 978-3540607465, 1996.
- [12] Thill, C., Etches, J. Bond, I., Potter, K., Weaver, P.: *Morphing Skins*. The Aeronautical Journal, Paper 3216, March 2008.
- [13] Nachtigall, W.: *Bionik-Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer Verlag, ISBN-13: 978-3642623998, 2002.

- [14] Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faser- Kunststoff- Verbunden*. Springer Verlag, 2. Neubearbeitete und erweiterte Auflage, ISBN-13: 978-3540721895, 2007.
- [15] Grote, K.-H., Feldhusen, J.: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 23., neu bearb. u. erw. Aufl., 2012, XLVI, ISBN 978-3-642-17305-9.
- [16] Altenbach, H., Altenbach, J., Rikard, R.: *Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996. ISBN 3-3-42006811.
- [17] Joao Luis Carvalho Monteiro, Markus Kintscher: *Entwicklung einer flexiblen Flossenhinterkante im Projekt NEWA - New Morphing Technologies for Trailing Edge*, DLR interner Bericht IB 131-2013/91, DLR-Institut für Faserverbund und Leichtbau, 2013.
- [18] Tech Note TN-508-1, Micro-Measurements, Vishay Precision Group, Mai 2010
- [19] A. Horoschenkoff, Strukturintegration von Dehnmessstreifen, HBM, 2006